



รายงานการวิจัย
เรื่อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองเพื่อพัฒนา
การผลิตไฟฟ้าในกังหันลม

Self-Excited Induction Generator for Development
Generate Electricity of Wind Turbine

โดย

นายยุทธนา พลอยฉาย และคณะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 ตามมติคณะรัฐมนตรี
จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



รายงานการวิจัย เรื่อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองเพื่อพัฒนา
การผลิตไฟฟ้าในกังหันลม

Self-Excited Induction Generator for Development
Generate Electricity of Wind Turbine

โดย

นายยุทธนา พลอยฉาย

นายเจิมธง ประารณารักษ์

นางสาวกั้งสดาล สกุลพงษ์มาลี

นางสาวน้ำฝน คล้ายทอง

นางสาวพรอริยา ฉิรินัง

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 ตามมติคณะรัฐมนตรี
จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 คำถามวิจัย	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	4
1.6 วิธีการวิจัย	5
1.7 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	7
2.2 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	11
2.4 การนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	12
2.5 สมการแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	15
2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	20
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง	24
2.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม	27
2.9 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	27

2.10 การควบคุมแบบเวกเตอร์ปรับตัวได้ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล	29
2.11 ทฤษฎีของกังหันลม	53
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	73

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	
3.1 การออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกลของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสม	78
3.1.1 การรวมทฤษฎีโมเมนต์และทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ	80
3.1.2 ขั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณ	82
3.2 การออกแบบกลไกควบคุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง	91
3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม	92
3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง	95
3.2.3 การควบคุมแบบเวกเตอร์	96
3.2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว	98
3.2.5 การควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิทัลด้วยโปรแกรม Simulink	102
บทที่ 4 การผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองสำหรับกังหันลมหลายใบ	
4.1 การออกแบบกังหันลม	105
4.2 การเลือกขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	106
4.3 ผลการวิจัย	108
4.4 สรุปผลการวิจัย	113
4.5 ข้อเสนอแนะ	114
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	115
5.2 ข้อเสนอแนะ	115

บรรณานุกรม	116
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้ผ่านการนำเสนอ	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สถานะของแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส (1= สถานะเปิด, 0=สถานะปิด)	40
2.2 สรุปล่วงเวลาของการสวิตช์ในทุก Section	41
2.3 ชื่อสัญญาณของ Event Manager A และ Event Manager B	50
3.1 ค่าความเร็วลม กำลังลมเฉลี่ย และไวบูลล์พารามิเตอร์ –สถานีบ้านดอนใน	79
3-2 ค่าความยาวคอร์ดที่ความเร็วลม 3 – 7 เมตร/วินาที ที่ได้จากการคำนวณ	85
3-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของกังหันลมกับความเร็วลม	93
4-1 ป้ายพิกัดและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	121
4-2 แสดงข้อมูลความเร็วรอบ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย	124
4-3 แสดงข้อมูลความเร็วรอบ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย	125
4-4 ตารางเปรียบเทียบผลของกำลังการผลิตไฟฟ้ากับความเร็วลมแต่ละระดับ	126
4-5 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ากับความเร็วลมแต่ละระดับ	126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 แสดงกรอบแนวคิดโครงการวิจัย	4
2-1 แสดงการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำในการบำบัดน้ำเสียสำหรับฟาร์มกุ้ง	8
2-2 กราฟแสดงคุณลักษณะแรงบิดกับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2-3 สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
2-4 โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	10
2-5 แสดงโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	10
2-6 โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบฟันขดลวด	11
2-7 แสดงการติดตั้งแท่นเสริมมอเตอร์เกียร์เพื่อยืดอายุการใช้งาน	13
2-8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	16
2-9 แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 เฟส	17
2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 3 เฟส abc กับปริมาณ 2 เฟส d-q	18
2-11 ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส	20

2-12	วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงกับสเตเตอร์	21
2-13	วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนึ่งสองเฟส	24
2-14	ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามโรเตอร์	30
2-15	ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามสเตเตอร์	31
2-16	ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามในช่องว่างอากาศ	31
2-17	แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS	33
2-18	วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	35
2-19	การสเปซเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า	36
2-20	พิกัดเวกเตอร์ระบบสามเฟสกับระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนึ่ง	37
2-21	เวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการรวมของเวกเตอร์สองตัวในช่วง Section ที่ 1	38
2-22	รูปแบบวิธีการสวิตช์ในแต่ละ Section	40
2-23	แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดัน	41
2-24	แสดงไดอะแกรมของการสวิตช์ในแต่ละ Section	42
2-25	รูปร่างของบอร์ด eZdsp TMS 320F2812	43
2-26	ส่วนของแอกคิวแลเตอร์ที่เข้าถึงได้	46
2-27	ส่วนของรีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตั้งสำหรับคุณที่สามารถเข้าถึงได้	46
2-28	ส่วนของรีจิสเตอร์ผลลัพธ์ที่สามารถเข้าถึงได้	46
2-29	รีจิสเตอร์ XAR0-XAR7	47
2-30	รีจิสเตอร์สถานะ ST0	47
2-31	รีจิสเตอร์สถานะ ST1	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2-32	บล็อกไดอะแกรมของการเชื่อมต่อกับภายนอก	49
2-33	การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	52
2-34	วงจรรอบของอินเวอร์เตอร์	53
2-35	ลักษณะของความเร็วมายใต้ชั้นบรรยากาศ (atmosphere boundary layer)	53
2-36	ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	54
2-37	สัมประสิทธิ์กำลังงาน และอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดของกังหันลมแบบต่างๆ	56
2-38	กระบวนการเกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์	57

2-39	กราฟการทำงานของกังหันลม	58
2-40	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p), สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T) กับค่าแลมด้า (λ)	59
2-41	เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ	60
2-42	หลักการของโมเมนตัม	61
2-43	แบบจำลองการไหลผ่าน Actuator disk	61
2-44	ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_T และ a	64
2-45	แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านเข้า-ออกกังหันลม	66
2-46	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่างๆ	68
2-47	แสดงการเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณด้านหลังกังหันลม เนื่องจากการหมุนของกังหันลม	68
2-48	ความเร็วลมและแรงที่กระทำบนใบกังหันลม	70
2-49	แผนภาพความเร็วลมที่เกิดขึ้นบนใบพัดใบหนึ่งของกังหันลมแกนระดับ	71
3-1	การกระจายของความเร็วและทิศทางลมเฉลี่ยรายปี สถานีวัดลมบ้านดอนใน	78
3-2	แผนที่ศักยภาพพลังงานลมเฉลี่ยรายปีและแผนที่รวมลมสงบ สถานีวัดลมบ้านดอนใน	79
3-3	ลักษณะของแผนอากาศที่ใช้ในการออกแบบ	80
3-4	แผนภาพความเร็วลมที่เกิดขึ้นบนใบพัดใบหนึ่งของกังหันลมแกนระดับ	80
3-5	Flowchart แสดงขั้นตอนการคำนวณ	84
3-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 6 ใบ	86
3-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 10 ใบ	86
3-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 15 ใบ	87
3-9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 20 ใบ	87

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 24 ใบ	88

3-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่ความเร็วลม 3 เมตร/วินาที	88
3-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที	89
3-13 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองสำหรับกังหันลมหลายใบ	91
3-14 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม	92
3-15 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส	95
3-16 แสดงการแปลง 3 เฟสเป็น 2 เฟส (Clarke's Transformation)	97
3-17 การแปลงแกนจาก 2 เป็น 3 เฟส (Park's Transformation)	97
3-18 การแปลงแกนจากแกนอ้างอิงสเตเตอร์อยู่ในแกนสามเฟส	97
3-19 แสดงการสร้างสเปซเวกเตอร์พลาสมาคู่เลขชั้น	98
3-20 แสดงระบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัวได้ (MRAS)	99
3-21 Flowchart แสดงขั้นตอนการคำนวณการควบคุมเวกเตอร์ปรับตัวได้	100
3-22 แสดงผลการควบคุมแบบปรับตัวได้จำลองความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	101
3-23 แสดงแบบจำลองการควบคุมแบบปรับตัวได้ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink	102
3-24 ระบบควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812	103
4-1 แสดงส่วนประกอบหลักของกังหันลม	117
4-2 แสดงพื้นที่ใบพัดและขนาดของชุดใบกังหัน	119
4-3 มอเตอร์เกียร์ยี่ห้อ Nord	121
4-4 nameplate motorgear	121
4-5 การติดตั้งกังหันลม	122
4-6 ชุดควบคุมและป้องกันการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	123
4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส	123
4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังไฟฟ้า	124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

a	ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน
a'	ค่าการเหนี่ยวนำเชิงมุม
A	พื้นที่ภาคตัดขวางของกังหันลม
A	พื้นที่ใบของกังหันลม
A	พื้นที่กวาดของกังหันลม
b	ความยาวของใบกังหันลม
B	จำนวนใบของกังหันลม
c	ความยาวคอร์ดใบพัด
C_P	สัมประสิทธิ์กำลัง
C_Q	สัมประสิทธิ์แรงบิด
C_T	สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก
dD	อนุพันธ์ของแรงต้าน
dF	อนุพันธ์ของแรงในแนวสัมผัส
dL	อนุพันธ์ของแรงยก
dP	อนุพันธ์ของงานในย่านวงแหวนที่รัศมีใด ๆ
dQ	อนุพันธ์ของแรงบิด
dT	อนุพันธ์ของแรงตั้งฉาก
D	แรงต้าน
F	การสูญเสียพลังงานที่ปลายใบ
f	ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า
g	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
I_1	กระแสที่ไหลในขดลวดต่อเฟส
I_2	กระแสที่ไหลในขดลวดต่อเฟส
$i_{r\alpha}$	กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α
$i_{r\beta}$	กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ β
i_{rd}	กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ d
i_{rq}	กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ q

i_{mR}	กระแสกระตุ้นโรเตอร์ฟลักซ์
L	แรงยก
n_s	ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

n_r	ความเร็วรอบของโรเตอร์
N	ความเร็วรอบกังหันลม
N	ความเร็วรอบ
$N_{Practice}$	ความเร็วรอบจากการทดสอบ
P	กำลังงาน
P	จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์
$P_{cu, stator}$	กำลังการสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์
$P_{cu, rotor}$	กำลังการสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์
P_{in}	กำลังไฟเอาต์พุท
P_{losses}	กำลังการสูญเสียในระบบ
P_{out}	กำลังไฟเอาต์พุท
P_w	กำลังงานของลม
P	ความดันสถิตย
Q	โมเมนต์บิดหรือแรงบิดที่เกิดขึ้น
r	รัศมีภายในของกังหันลม
R	รัศมีกังหันลม
R_1	ความต้านทานของขดลวดต่อเฟส
R_2	ความต้านทานของขดลวดต่อเฟส
N	ความเร็วรอบ
$N_{Practice}$	ความเร็วรอบจากการทดสอบ
N_{Theory}	ความเร็วรอบจากการคำนวณ
s	เปอร์ยูนิตสลิป
T	แรงตามแนวแกน
u	ความเร็วลมเฉลี่ย
U	ความเร็วที่ขอบใบพัด

V	ความเร็วเฉลี่ยของลม
V	ความเร็วลม
$V_{s\alpha}$	แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์
$V_{s\beta}$	แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์
V_{sd}	แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์
V_{sq}	แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

W	ความเร็วลมสัมพัทธ์
x	อัตราส่วนระหว่าง r กับ R
α	มุมปะทะ
β	มุมติดตั้งใบพัด
λ	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ
λ_r	อัตราส่วนความเร็วที่ตำแหน่งรัศมีใด ๆ
$\lambda_{s\alpha}$	สเตเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α
$\lambda_{s\beta}$	สเตเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ β
$\lambda_{r\alpha}$	โรเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ d
$\lambda_{r\beta}$	โรเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ q
ϕ	มุมลมเข้า
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ
σ	ความแน่นจำเพาะที่รัศมีใด ๆ
Ω	ความเร็วเชิงมุม
η_D	ประสิทธิภาพของ Actuator disk
η	ประสิทธิภาพ
ω	ค่าความเร็วเชิงมุม
ω	ความเร็วเชิงมุมของลำอากาศหมุน (Wake)
ω_r	ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Stator angular frequency)
ω_s	ค่าความเร็วเชิงมุมของไฟฟ้า
ω_{slip}	ความถี่เชิงมุมสลิป (slip angular frequency)

-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของมนุษย์และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม นับตั้งแต่สมัยปฏิวัติอุตสาหกรรมเป็นต้นมา อัตราการใช้พลังงานของมนุษย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทุกปี จนก่อให้เกิด “วิกฤตการณ์พลังงาน” ซึ่งสาเหตุของการขาดแคลนเชื้อเพลิงก็คืออัตราการเพิ่มของการใช้มากกว่าอัตราการเพิ่มของการผลิต และการลดอัตราการผลิตของกลุ่มประเทศผู้ผลิตน้ำมัน จนก่อให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันขึ้นในปี พ.ศ. 2516 เป็นต้นมา ทำให้ประเทศกำลังพัฒนาที่ต้องพึ่งพาน้ำมันดิบจากต่างประเทศเป็นพลังงานในการพัฒนาประเทศต่างก็ประสบปัญหา ซึ่งมีผลกระทบต่อภาวะเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศอย่างมาก จากสัดส่วนการใช้พลังงานปฐมภูมิของโลกในปี 2548 พบว่า น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินมีปริมาณการใช้รวมกันถึงร้อยละ 96 พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวลมีปริมาณการใช้รวมกันเพียงร้อยละ 4 ส่วนที่เหลือคือพลังงานนิวเคลียร์ และจากการคาดการณ์ของกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกาในอีก 13 ปีข้างหน้า หรือประมาณปี พ.ศ. 2563 คาดว่าสัดส่วนการใช้พลังงานของโลกจะมีการใช้น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินมีปริมาณการใช้รวมกันลดลงเหลือร้อยละ 89 พลังงานหมุนเวียนมีการใช้เพิ่มขึ้นร้อยละ 8 และที่เหลือเป็นพลังงานนิวเคลียร์

ส่วนปัญหาด้านพลังงานของประเทศไทยนั้นรัฐบาลต้องหาแนวทางแก้ไขปัญหา ซึ่งแนวทางหนึ่งของการแก้ปัญหาของรัฐบาลก็คือออกพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 และจัดตั้งหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อมารับผิดชอบด้านพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ในประเทศ การใช้พลังงานหมุนเวียนของประเทศในปัจจุบันยังต่ำมาก ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่เกี่ยวกับปัญหาทางด้านเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพต่ำจึงทำให้ราคาพลังงานที่ได้มีค่าสูงกว่าพลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ทำให้การเปลี่ยนมาใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นไปได้อย่างยากลำบาก จากแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 ได้กำหนดนโยบายทางพลังงานเป็นนโยบายเร่งด่วนและมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นร้อยละ 8 รวมทั้งลดสัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลดการใช้น้ำมันในภาคการขนส่งให้เหลือร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานทั้งหมด

ดังนั้นการวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นมากในการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาพลังงานมีค่าลดลงจนอยู่ในระดับที่สามารถนำมาใช้ได้จริงและเป็น

พลังงานที่ยั่งยืนต่อไปในอนาคต และจากสนธิสัญญาเกียวโต ซึ่งเป็นการตกลงร่วมกันระหว่างประเทศต่างๆ ทั่วโลก เพื่อที่จะลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นไปห่อหุ้มชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้ความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมาบนผืนโลกไม่สามารถสะท้อนออกไปได้ เป็นเหตุให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น สิ่งแวดล้อมในธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ภัยพิบัติต่างๆ จึงเกิดขึ้นตามมา สนธิสัญญาเกียวโต มีเป้าหมายที่จะลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ 5.2 % ภายในปี 2555 และเนื้อหาสำคัญในสนธิสัญญา คือ จะมีการกำหนดโควตาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้แก่แต่ละประเทศ หากประเทศใดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มากกว่าโควตา จะต้องจ่ายค่าชดเชยให้กับประเทศที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้อยกว่าโควตา หรือเปรียบได้กับการซื้อ-ขายโควตาในการปล่อยมลภาวะนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม พลังงานหมุนเวียนที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น จะใช้พลังงานธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งสุดท้ายก็ต้องพึ่งพาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทต่างๆ เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ปัจจุบันบางพื้นที่ของประเทศไทยยังไม่มีไฟฟ้าใช้ เนื่องจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่สามารถเข้าถึง เนื่องจากเป็นเขตพื้นที่ภูเขา หรือ ตามหมู่เกาะ อีกทั้งติดปัญหาด้านกฎหมายในพื้นที่อุทยานฯ เป็นต้น ดังนั้นการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงมีความเหมาะสมมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอื่น เพราะมีข้อดีในด้านของขนาด ความแข็งแรง ทนทาน โครงสร้างของเครื่องจักรกลไม่ซับซ้อน การบำรุงรักษากระทำได้ง่าย ไม่ต้องอาศัยการเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าเมื่อทำงานในสภาวะกระตุ้นตัวเองโดยเงื่อนไขที่จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองนั้น จะต้องมีส่วนแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) อยู่ในขดลวดโรเตอร์และชุดตัวเก็บประจุจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ ขนาดของโหลดและความเร็วรอบที่ได้รับจากตัวขับเคลื่อนกำลังต้องมีความเหมาะสมจึงจะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล, 2552, บทที่ 1)

กังหันลม (Wind Turbine) เป็นเครื่องจักรกลที่สามารถรับพลังงานจลน์ จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ (Lancashire, Kenna, & Fraenkel, 1987, chap.1) จากนั้นนำพลังงานกลมาใช้งานประโยชน์โดยนำไปใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การสูบน้ำ (Meel, J.V., & Smulders, P., 1989, chap.2) เป็นต้น การพัฒนากังหันลมเพื่อใช้ประโยชน์มีมาตั้งแต่โบราณ และมีความต่อเนื่องถึงปัจจุบัน (Hav, E., 2005, chap.1) โดยการออกแบบกังหันลมจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลม และหลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่างๆ เพื่อให้ได้กำลังงาน พลังงาน และประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับการนำกังหันลมแบบหลายใบมาใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้านั้นมีความจำเป็นที่จะต้องทราบสมรรถนะของกังหันลมเชิงทฤษฎี เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมมาสู่การสร้างจริง โดยออกแบบให้มีแรงบิด (Torque) ปลายเพลากังหันลมสามารถนำไปขับกลไกการขับเคลื่อนทางกลผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไปได้ จากการศึกษาสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน โดยทำการทดสอบจ่ายโหลดเพียงลำพัง (Stand Alone) แบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย (Grid

Connection) และแบบสะสมพลังงานเข้ากับแบตเตอรี่ (Battery Charger) ผลของการทดสอบพบว่า การทดสอบแบบสะสมพลังงานเข้ากับแบตเตอรี่ มีความเหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมากที่สุด (ทวีศักดิ์ ต้นอร่าม และ สลิลทิพย์ สีนธุสนธิชาติ, 2551, น.488-492) การทำงานของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะมีข้อดีคือ มีความแข็งแรงทนทาน ต้องการการบำรุงรักษาน้อย มีระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อน มีโครงสร้างที่มีน้ำหนักต่อหน่วยการผลิตต่ำ เมื่อเทียบราคาติดตั้งต่อหน่วยผลิตกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆแล้วจะมีราคาถูกกว่า ไม่ต้องการกำลังในการหมุนคงที่ โดยหลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมผลิตไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องออกแบบให้ความเร็วโรเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วเชิงโคโรนัส แท่งตัวนำที่ฝังในโรเตอร์เคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วเชิงโคโรนัส กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในแท่งตัวนำโรเตอร์จะไหลตรงข้ามกับทิศทางเดิม ทำให้เกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงจากทางด้านโรเตอร์ส่งผ่านมายังทางด้านสเตเตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า สำหรับตัวเก็บประจุที่ต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่ ระบบไฟฟ้า (พุทธพร เศรษฐสกุลานนท์ และวิจิตร กิณเรศ, 2551, น.650-655) สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นั่นคือ เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหัน พลังงานจลน์ที่เกิดจากลมจะทำให้ใบพัดของกังหันลมเกิดการหมุน และได้เป็นพลังงานกลออกมา พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสม สำหรับในจังหวัดเพชรบุรีมีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 3.5 เมตรต่อวินาที (พงศภัค สุขสนาน และ ยุทธนา พลอยฉาย, 2553, น. B1-3# 1-10) จึงจำเป็นต้องออกแบบกังหันลมทำงานในช่วงความเร็วประมาณ 3-4 เมตรต่อวินาทีต่อไป ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะวิจัยพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระตุ้นตัวเองเพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลม สอดคล้องกับพื้นที่ในเขตจังหวัดเพชรบุรี และใกล้เคียงเป็นพื้นที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย บริเวณแหลมผักเบี้ย โดยในปัจจุบันพลังงานลมเป็นพลังงานที่ได้รับความสนใจในการวิจัยทั้งภาครัฐและเอกชน ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาผลิตไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลม แต่ส่วนใหญ่จะต่อเข้ากับระบบกริดของการไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวทางการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ เพื่อสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งอาศัยกังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนผ่านระบบทางกลและควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัลร่วมกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ทำให้เกิดการสกัดพลังงานจากลมได้สูงสุดให้สัมพันธ์กับกังหันลมตามพื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสมในรูปแบบจัดเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง

1.2 คำถามวิจัย

- 1.2.1 ความเป็นไปได้ของการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าในกังหันลม โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งเป็นอย่างไร

- 1.2.2 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง เพื่อการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลมตามศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่งเป็นเท่าไร

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมแกนนอน
- 1.3.2 เพื่อศึกษากลไกการขับเคลื่อนทางกลของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง
- 1.3.3 เพื่อศึกษาออกแบบการควบคุมการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง โดยการใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล
- 1.3.4 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองจากการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสม

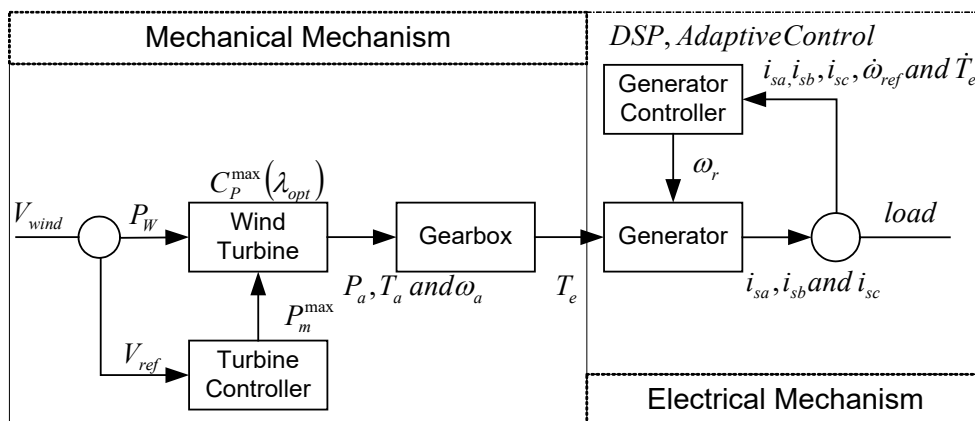
1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลมนี้ ในหนึ่งระบบโรงจักร (Plant System) ออกแบบระบบควบคุม กลไกการขับเคลื่อน ให้เหมาะสมกับกังหันลมในรูปแบบจัดเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง ตามพื้นที่ศักยภาพ ในสถานะการใช้งานจริง
- 1.4.2 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้ามีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับศักยภาพของพื้นที่ ที่ดำเนินการวิจัย
- 1.4.3 ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าคิดจากผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองจากการติดตั้งกังหันลม
- 1.4.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้าโดยการควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล ร่วมกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) โดยการจำลองระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรมMATLAB/SIMULINK

1.5 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองเพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลม ใช้หลักการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยอาศัยหลักการทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์กระตุ้นการสร้างกระแสเชิงสนามในการสตาร์ทเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกล (Mechanical Mechanism) ของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสมและกลไกการควบคุมทางไฟฟ้า (Electrical Mechanism) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองโดยการใช้การ

ควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล ประมวลการควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็ก ร่วมกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) นำไปผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการสร้างกำลังรีแอกทีฟ ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งอาศัยกังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนผ่านระบบทางกล ให้สัมพันธ์กับ ศักยภาพที่เหมาะสมในรูปแบบจัดเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง



รูปที่ 1-1 แสดงกรอบแนวคิดโครงการวิจัย

ศักยภาพของพลังงานลมเฉพาะแห่งเป็นองค์ประกอบสำคัญ เพื่อการออกแบบกังหันลม (Wind Turbine) ทำให้ทราบคุณลักษณะเฉพาะกังหันลม ที่ถูกควบคุมด้วยชุด Turbine Controller ควบคุมทิศทาง หรือการปรับมุมใบ เป็นต้น ได้งานส่งผ่านเพลลา (Shaft) ทราบกำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทราบกำลังการผลิตไฟฟ้า แต่เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกในการสร้างปริมาณสนามแม่เหล็กในการกระตุ้น ปริมาณการสร้างกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟ ด้วยผ่านชุดควบคุม Generator Controller ได้งาน ทำให้ทราบกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่เหมาะสม ผ่าน Converter เข้าระบบจำหน่าย หรือ อาจจัดเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง

จากรูปที่ 1-1 จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนกลไกการขับเคลื่อนทางกล (Mechanical Mechanism) และกลไกการควบคุมทางไฟฟ้า (Electrical Mechanism) โดยที่ กลไกขับเคลื่อนทางกลจะประกอบไปด้วย ใบกังหันลม ชุดเกียร์ทดรอบ ส่งผ่านกำลังมาที่เพลลาไปสู่ กลไกการควบคุมทางไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง โดยการควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็กเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบ โดยใช้หลักการเวกเตอร์คอนโทรล (Vector Control) หรือ ฟิวดออเรียนเต็ดคอนโทรล (Field Oriented Control) ร่วมกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล

1.6 วิธีการวิจัย

1.6.1 ค้นคว้า ศึกษา เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางธรรมชาติของลม ศักยภาพ กังหันลม และกำหนดกรอบแนวความคิดในการคิดค้นกลไกที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง และศึกษาสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ตลอดจนค้นคว้าและศึกษา

1.6.2 ศึกษาและกำหนดคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ศึกษาและกำหนดลักษณะต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลกระทบเนื่องจากโหลดที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รูปแบบการทำงานของกลไก ขับเคลื่อนทางกลผ่านกังหันลมแนวแกนนอน เป็นต้น

1.6.3 สร้างและทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เพื่อจำลองการทำงาน

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และใบกังหันลม โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูพฤติกรรมการทำงาน และปัจจัยอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ

1.6.4 สร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองเพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลม

นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาสร้างต้นแบบในแต่ละส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง โดยการควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัลรวมกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) พร้อมทั้งผลิตใบกังหันลม

1.6.5 ทดลองการทำงานและบันทึกผล

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน ความสามารถในการผลิตไฟฟ้า ศึกษาเสถียรภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อปรับแต่งการทำงานให้สมบูรณ์ และเก็บบันทึกผลการทดสอบต่างๆ เช่น ความเร็วรอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ เป็นต้น ด้วยอุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูล (Data Logger) เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผล

1.6.6 ติดตั้งในสถานที่ที่เหมาะสม วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

ติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ศักยภาพ วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาและเผยแพร่

1.6.7 ถ่ายทอดเทคโนโลยีและผลการวิจัย

ตีพิมพ์เผยแพร่ผลการศึกษารายงาน และถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มเป้าหมาย

1.7 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

โดยในรายงานวิจัยนี้ได้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึง ความสำคัญและที่มาของปัญหา คำถามวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย วิธีการวิจัย และการจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึง หลักการทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ทฤษฎีของลม อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมแกนนอน การจำลองระบบควบคุมกังหันลม ทฤษฎีการควบคุมแบบปรับตัวได้ เป็นต้น

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกลของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยแบ่งหัวข้อตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย การประเมินศักยภาพพลังงานลม การวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของกังหันลมโดยการรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink การออกแบบกลไกควบคุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเอง การควบคุมแบบเวกเตอร์ แบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัวได้ การควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิทัลรุ่น ezdsp TMS320F2812

บทที่ 4 กล่าวถึงการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับกังหันลมหลายใบ การออกแบบกังหันลม การเลือกขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การสร้างกังหันลมต้นแบบ การติดตั้งกังหันลม ผลการวิจัย และสรุปผลจากการวิจัยเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองจากการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสม

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยนี้เสนอแนวทางการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ เพื่อสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งอาศัยกังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนผ่านระบบทางกลและควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล ร่วมกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ทำให้เกิดการสกัดพลังงานจากลมได้สูงสุด ให้สัมพันธ์กับกังหันลมตามพื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสมในรูปแบบจัดเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง โดยใช้การสร้างจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ร่วมกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมแกนนอนเชิงทฤษฎีตามหลักการทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ของกังหันลม ก่อนนำไปสู่การจำลองระบบการควบคุม (Control System) การทำงานของกังหันลม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นหลักการและทฤษฎีที่สำคัญในการจำลองการทำงาน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยนำเสนอเป็นลำดับขั้น ดังนี้

2.1 หลักการทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปจะนิยมนำไปใช้งานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับใช้เป็นตัวต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และงานทางด้านพลังงานทดแทน เนื่องจากมีราคาถูก หลักการทำงานไม่ซับซ้อน มีความสะดวกและง่ายต่อการบำรุงรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ ปัจจุบันในต่างประเทศรวมทั้งภายในประเทศได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานในทั้งสถานะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ ดังในตัวอย่าง ตามรูปที่ 2.1 ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำในการบำบัดน้ำเสีย (Waste Water Treatment) สำหรับฟาร์มกุ้ง และสถานะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำ เป็นต้น¹ ซึ่งการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าผลต่างระหว่างความถี่ทางไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ ซึ่งเรียกว่าค่าสลลิป (Slip) ดังนั้นเมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสถานะเป็นมอเตอร์ จะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุน โดยที่สลลิปมีค่าเป็นบวก จะดึงกระแส 2 ส่วนจากแหล่งจ่ายไฟ ได้แก่ ส่วนแรกจะใช้ในการกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน และส่วนที่สองจะใช้ใน

¹ วุชริน ศรีรัตนวิชัยกุล, 2552, การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบที่ดับเบิลยูเอ็ม,มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 88 หน้า

การสร้างกำลังจริง กำลังงานเอาต์พุตทางกล และความสูญเสียภายใน ถ้าโหลดถูกตัดออกไป มอเตอร์ก็จะยังดึงกระแสส่วนที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเท่าเดิม กระแสที่ใช้ในการสร้างกำลังจริงจะมีค่าน้อยมากเนื่องจากถูกใช้ไปในส่วนของความสูญเสียภายในเท่านั้น² และเมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะต้องมีการจ่ายกำลังทางกลเข้าไปที่เพลลาของโรเตอร์เพื่อเป็นตัวต้นกำลัง ชับจนกระทั่งความเร็วของโรเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งสลิปมีค่าติดลบ กระแสจะตามหลังแรงดันไฟฟ้า (I lag V) มากกว่า 90 องศา ค่า Power Factor มีค่าเป็นลบ และเมื่อมีการปรับระดับความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น และจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบมากขึ้น และกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าที่พิกัด เมื่อเกิดสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วจะได้เส้นกราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.2 เพื่อเป็นการชดเชยค่าพลังค์ โดยการไหลของกระแสสแตเตอร์จะมีทิศทางการไหลสวนทางกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์^{3,4}



รูปที่ 2.1 แสดงการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำในการบำบัดน้ำเสียสำหรับฟาร์มกุ้ง

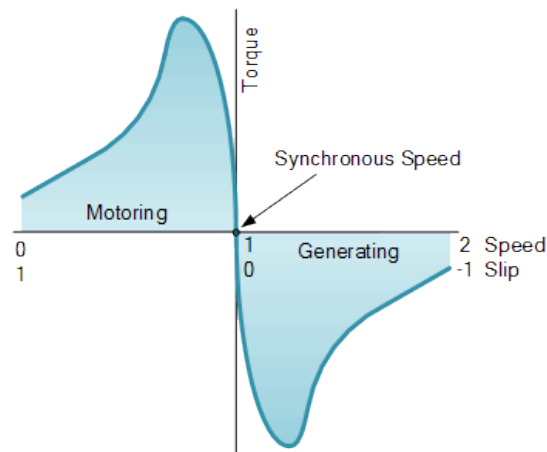
ที่มา : นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤศจิกายน 2556 – มกราคม 2557

² P.Lumyong, and C. Chat-uthai. "Power Minimization Technique for Induction Motor Load Test." IEEE Conference IPEMC 2000. Vol.2, August 2000. Pp.570-573.

³ V. Subbiah, and K.Geetha, "Certain investigations on a grid connected induction generator with voltage control," Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. Vol 1, 8-11 January 1996. Pp. 439-444.

⁴ A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik, "Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor," IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol.5, No. 4, December 1990. pp. 725-732.



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงคุณลักษณะแรงบิดกับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ที่มา <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ^{5,6,7}

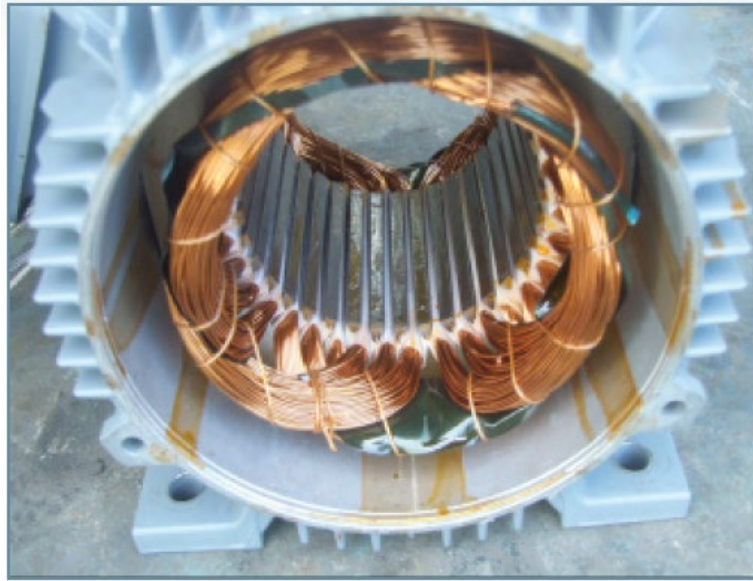
โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของสเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่มีแกนเป็นแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated sheet steel) ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าชนิดซิลิกอน (Silicon steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสล็อต (Slot) ของแกนเหล็ก โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กในรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ซึ่งลักษณะของรูป สเตเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

⁵ นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน พฤษภาคม-กรกฎาคม 2556

⁶ นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน สิงหาคม-ตุลาคม 2556

⁷ นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤศจิกายน 2556 – มกราคม 2557

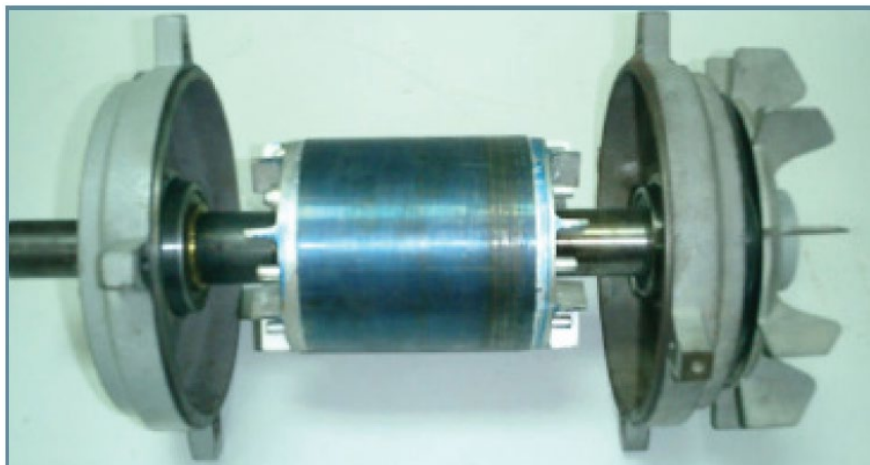


รูปที่ 2.3 สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

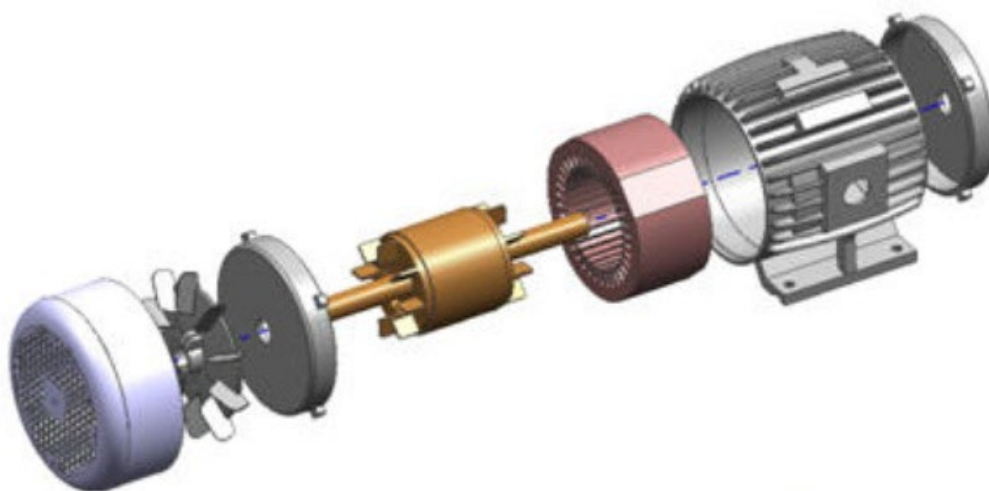
ที่มา: นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน พฤษภาคม-กรกฎาคม 2556

2. โรเตอร์ (Rotor) โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นโรเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น (Non-salient-pole) หรือทรงกระบอก (Cylindrical rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

(ก) โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) โรเตอร์ประเภทนี้ที่แกนของโรเตอร์ จะทำด้วยเหล็กลามิเนตเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่อง ตรงกลางแผ่นเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นลามิเนตเหล่านี้มาทำการอัดเข้าด้วยกันจะได้แกนโรเตอร์ เมื่อนำแกนโรเตอร์เข้าไปวาง ในแบบพิมพ์แล้วฉีดอลูมิเนียมชนิดเหลวเข้าไป จะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสลีต และมีครีบยื่นออกไปทั้งสองข้าง เพื่อใช้เป็นใบพัด สำหรับระบายความร้อน และเมื่ออัดเพลลาเข้าไปที่รูกลางแกนโรเตอร์ จะได้โรเตอร์แบบกรงกระรอก รูปร่างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก แสดงดังรูปที่ 2.4 และส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก
ที่มา: นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน พฤษภาคม-กรกฎาคม 2556



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/41922>

(ข) โรเตอร์แบบพันขดลวด (wound rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่อง สลิตเช่นเดียวกับสเตเตอร์โดยส่วนปลายของ ขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (Slip ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับส่วนวงจรภายนอก เพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์ หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้ว ของสเตเตอร์และไม่สามารถหมุนเร็วมากได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงทางกลต่ำ นอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอกแต่ ข้อดี

ของโรเตอร์ประเภทนี้คือ สามารถกำหนดค่าแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อค่าความต้านทานภายนอก รูปร่างของโรเตอร์แบบพันขดลวดแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด
ที่มา: นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน พฤษภาคม-กรกฎาคม 2556

2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ได้รับค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายภายนอกที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมที่ต่างกัน 120 องศา จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ดังสมการ

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

โดย f เป็นค่าความถี่ไฟฟ้าของสเตเตอร์หน่วยเฮิรต (Hz) และ

P เป็นจำนวนขั้วของ มอเตอร์ หน่วยขั้ว (Pole)

จากสมการที่ (2.1) ความเร็วซิงโครนัส จะเห็นได้ว่าความเร็วซิงโครนัสจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแหล่งจ่าย และจำนวนขั้วของมอเตอร์ และสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ได้โดยการสลับลำดับเฟสของสัญญาณ กระแสไฟฟ้าคู่ใดคู่หนึ่ง ดังนั้นการกลับทิศการหมุนของมอเตอร์สามารถทำได้โดยสลับเฟสแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์คู่ใดคู่หนึ่ง จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้านี้จะมีผลทำให้เกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำต่างๆ ในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ (n_r) ซึ่งความเร็วโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป

ตามค่าภาระทางกล โดยเมื่อมีภาระทางกลน้อยๆ หรือไม่มีภาระทางกล ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัส และเมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้นค่า ความเร็วโรเตอร์ก็จะลดลง มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากแหล่ง จ่ายไฟฟ้า ตามความต้องการของภาระทางกล ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเร็วโรเตอร์มีการ เปลี่ยนแปลงตามภาระทางกล ในการอธิบายหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะสามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่า ความเร็วซึ่งเรียกว่าสลิป (Slip) ดังนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ s เป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ไม่มีหน่วย (n_s) เป็นความเร็วซิงโครนัสมีหน่วย เป็นรอบต่อ นาที (rpm) และ (n_r) เป็นความเร็ว โรเตอร์ (Rotor speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อ นาที (rpm) ซึ่งแสดง ในรูปสมการ

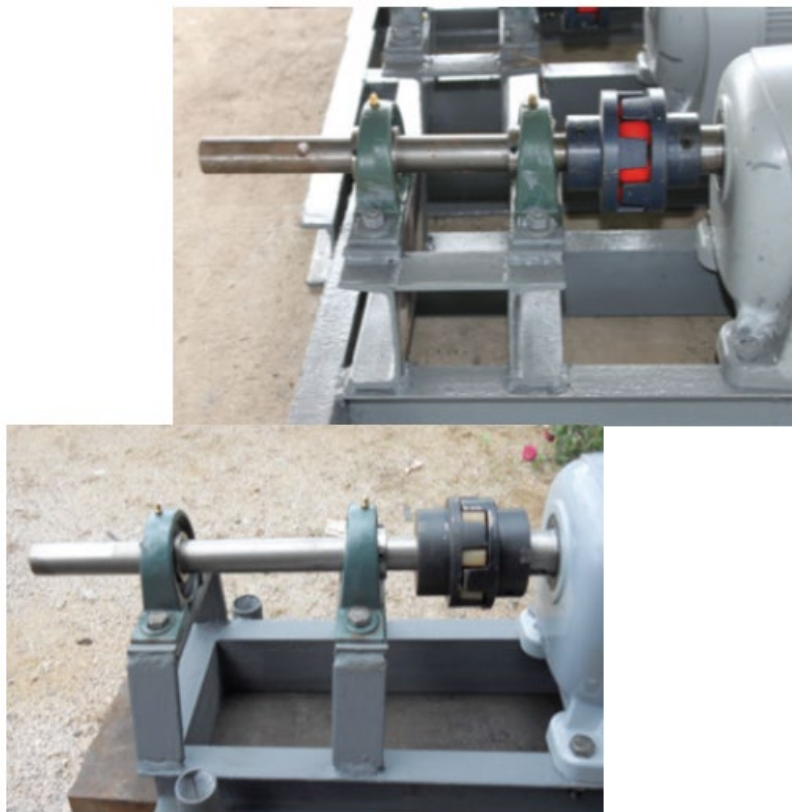
$$n_r = (1-s)n_s \quad (2.3)$$

2.4 การนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าที่ใช้พลังงานหมุนเวียนมาเป็นพลังงานต้นกำลังสำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเป็นระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังนั้นการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จำเป็นต้องทำให้เครื่องต้นกำลังขับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานจนถึงความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยคำนึงถึงทิศทาง การหมุนของเครื่องต้นกำลังกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ป้องกันการฝืนทิศทางการหมุนซึ่งจะเกิดความเสียหายได้ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีข้อดี คือ มีความแข็งแรงทนทาน ต้องการ การบำรุงรักษาน้อย มีระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อน มีโครงสร้างที่มีน้ำหนักต่อหน่วยผลิตต่ำ ไม่ ต้องการการชังค์โครไนซ์เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อเทียบราคาติดตั้งต่อหน่วยผลิตกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ แล้วจะมีราคาถูกกว่า ไม่ต้องการกำลังในการหมุนคงที่ แต่ข้อจำกัดที่สำคัญ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสก็คือ ไม่สามารถ ควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้ โดยปกติแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงพฤติกรรมการจ่าย กำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบ แต่ในทางตรงกันข้ามกลับมีความต้องการกำลังไฟฟ้าจินตภาพจากระบบ หรืออาจจะกล่าวได้ว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้แสดงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและใน ขณะเดียวกันก็แสดงพฤติกรรมเป็นภาระแบบเหนี่ยวนำด้วยเช่นกัน ดังนั้นในระบบของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ดีแล้วควรจะใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้าไปในระบบเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพ⁸

⁸ พันธ ชินบุตร, เทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 125 หน้า

แต่เนื่องจากการทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนียวนำมาทำงานในโหลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความต้องการความเร็วรอบสูงจึงจำเป็นต้องใช้เกียร์ทดรอบ หรือที่เรียกกันว่ามอเตอร์เกียร์ (Gear Motor) เป็นมอเตอร์พร้อมเกียร์สามารถต่อเพลาดตรงเข้ากับมอเตอร์ได้โดยตรงต่างจากระบบเดิมที่ต้องต่อระบบส่งถ่ายกำลังแบบมูเลย์ โซ่เฟืองหรือสายพาน มอเตอร์เกียร์ให้ความสะดวกในการติดตั้งเพราะต่อเพลาดตรงได้เลยทำให้ประหยัดพื้นที่ ทำให้ระบบมีขนาดเล็กกว่าแบบเดิมซึ่งมีขนาดใหญ่ และมีความสูญเสียกำลังขับในระบบส่งถ่ายค่อนข้างมาก ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน รวมทั้งยังไม่ต้องกังวลกับปัญหาสายพานขาด และไม่ต้องเติมน้ำมันหล่อลื่น ทำให้ลดต้นทุนการผลิตประการสำคัญคือให้ความเร็วรอบที่แม่นยำ สม่่าเสมอสำหรับระบบเดิม ถ้าเป็นระบบสายพานจะให้ความเร็วรอบที่ไม่แน่นอนเนื่องจากความหย่อนของสายพาน ทำให้ความเร็วรอบไม่ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ⁹ จากรูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งแทนเสริมมอเตอร์เกียร์เพื่อยืดอายุการใช้งาน



รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งแทนเสริมมอเตอร์เกียร์เพื่อยืดอายุการใช้งาน
ที่มา : นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤศจิกายน 2556 – มกราคม 2557

⁹ นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤศจิกายน 2556 – มกราคม 2557

ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของการเชื่อมต่อได้ดังต่อไปนี้คือ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid-connected Induction Generator) ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าจลน์จากระบบไฟฟ้านำไปสร้างสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic field) ที่ส่วนกระตุ้นสำหรับแรงดันและความถี่จะขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่จะไม่ขึ้นกับความเร็วของโรเตอร์เลย ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อกับระบบไฟฟ้า มีข้อดีที่สำคัญคือเป็นระบบที่ง่าย ไม่ซับซ้อน แรงดันไฟฟ้าและความถี่เท่ากับระบบไฟฟ้า ไม่ต้องการส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน ไม่ต้องการตัวต้นกำลังที่มีความเร็วคงที่ แต่ต้องการตัวต้นกำลังที่มีความเร็วมากกว่าซิงโครนัสเท่านั้น โดยส่วนใหญ่วิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ามาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมในพื้นที่ที่มีระดับความเร็วลมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา คือ วิธีการใช้ระบบเกียร์ควบคุมในการปรับระดับความเร็วรอบให้อยู่ในช่วงย่านที่เหมาะสม และจำเป็นจะต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบเพื่อใช้ในการชดเชยค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์¹⁰

2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่แยกจากระบบไฟฟ้า (Isolated Induction Generator) ลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะติดตั้งใช้งานแยกออกจากระบบไฟฟ้าเพียงลำพังและสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้จำกัดซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ก) แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก (Separate-Excited Induction Generator) และ ข) แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-Excited Induction Generator) โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

(ก) แบบแหล่งจ่ายกระตุ้นแยก (Separate-Excited Induction Generator)

จะสามารถสร้างแหล่งจ่ายขึ้นมาเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งอาจจะใช้แบตเตอรี่ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ เพื่อทำการแปลงพลังงานของแบตเตอรี่ที่เป็นพลังงานกระแสตรงมาเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ วิธีการควบคุมสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ในการใช้งานให้สัมพันธ์กับความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตลอดจนภาระทางไฟฟ้าที่อาจมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพื่อให้ได้แรงดันและความถี่คงที่และเหมาะสมตลอดย่านการใช้งาน

(ข) แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-Excited Induction Generator)

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาได้ก็ต่อเมื่อเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าเข้ามาในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ระบบไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า อีกทั้งเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดการขัดข้องจะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้ไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหาสิ่งที่จะช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

¹⁰ พันรบ ชินบุตร, เทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 125 หน้า

สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องพึ่งการเชื่อมโยงจากระบบไฟฟ้าก็จะทำให้ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ จะสังเกตได้ว่าการที่จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานได้นั้นจะต้องได้รับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หากทำการติดตั้งตัวเก็บประจุซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแทนที่ได้รับจากระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งจะเรียกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้ว่า “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง”¹¹ ซึ่งได้รับกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุ ที่ต่ออยู่กับขั้วสเตเตอร์ โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบภายนอก

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์เกียร์ซึ่งใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อพร้อมเกียร์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก ซึ่งจะทำงานโดยที่ไม่มีขดลวดกระตุ้น เมื่อขดลวดสเตเตอร์ได้รับกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุ ที่ต่ออยู่กับขั้วสเตเตอร์ จะมีกระแสกระตุ้นเกิดขึ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นภายในช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะขึ้นอยู่กับระดับความเร็วรอบ ในขณะที่โรเตอร์ถูกขับด้วยตัวขับเคลื่อนกำลังหมุนที่ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกจ่ายทางด้านสเตเตอร์ เมื่อวัดที่ขั้วทางด้านสเตเตอร์ จะพบว่ามีความแรงดันไฟฟ้าขนาดประมาณ 1-2 % ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดซึ่งเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กตกค้างภายในขดลวดโรเตอร์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะมีความถี่เท่ากับความถี่ที่ความเร็วซิงโครนัส เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ปลายขดลวดสเตเตอร์ โดยที่สามารถต่อเป็นแบบสตาร์หรือเดลต้าก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการแรงดันไฟฟ้า จากการที่ไม่ได้เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าทำให้ความถี่ที่ได้เป็นความถี่ที่เกิดขึ้นเอง โดยจะแปรตามขนาดตัวเก็บประจุ และโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ จึงเป็นปัญหาในการนำไปใช้งาน เพราะโหลดจะได้รับกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่านั้น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากก็จะจ่ายให้กับโหลดทั้งหมด ทำให้โหลดรับกำลังไฟฟ้ามากเกินไปอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหายได้ แต่ถ้าโหลดมีปริมาณที่มากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะส่งผลให้ไม่เกิดการกระตุ้นตัวเอง ดังนั้นในสภาวะการกระตุ้นตัวเองจึงจำเป็นต้องจัดโหลดให้มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย

12

2.5 สมการแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ¹³

¹¹ วชิริน ศรีรัตนวิชัยกุล, 2552, การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบที่ดับเบิลยูเอ็ม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 88 หน้า

¹² วชิริน ศรีรัตนวิชัยกุล, 2552, การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบที่ดับเบิลยูเอ็ม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 88 หน้า

¹³ สิริโรจน์ โจษาน, 2552, แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 90 หน้า

2.5.1 ความเป็นมาของกรอบอ้างอิง¹⁴

ในช่วงปลายทศวรรษ 1920 R.H. Park ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยทำการเปลี่ยนตัวแปรของแรงดัน กระแสและฟลักซ์เกี่ยวค้ำของที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ไปเป็นตัวแปรในรูปของขดลวดเสมือนซึ่งหมุนไปพร้อมโรเตอร์

ปลายทศวรรษที่ 1930 H.C. Stanley ได้ทำการแปลงตัวแปรสำหรับขดลวดโรเตอร์ (แรงดัน กระแส และฟลักซ์เกี่ยวค้ำ) สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไปเป็นตัวแปรในรูปของขดลวดเสมือนที่หยุดอยู่กับที่ที่สเตเตอร์

ต่อมา G. Kron ได้ทำการแปลงตัวแปรทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไปเป็นตัวแปรในรูปของขดลวดเสมือนที่หมุนด้วยความเร็วเดียวกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน

หลังจากนั้น D.S. Brereton ได้แปลงตัวแปรทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปยังขดลวดเสมือนที่ยึดติดกับโรเตอร์ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ได้นำวิธีของ R.H. Park ซึ่งใช้สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในที่สุด Park, Stanley, Kron และ Brereton ได้พัฒนาการเปลี่ยนตัวแปรแต่ละแบบให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะแต่ละอย่าง ในปี 1965 ได้มีการบันทึกไว้ว่าการที่จะกำจัดค่าความเหนี่ยวนำที่แปรไปตามการหมุนของโรเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้นั้น สามารถทำได้โดยการแปลงตัวแปรที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ไปยังขดลวดเสมือนหรือเรียกว่ากรอบอ้างอิง โดยกรอบอ้างอิงจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ หรือแม้กระทั่งหยุดอยู่กับที่ แต่สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะไม่เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่แปรเปลี่ยนตามการหมุนของโรเตอร์จะถูกกำจัดออกในกรณีที่กรอบอ้างอิงถูกยึดติดอยู่กับโรเตอร์เท่านั้น จากเหตุนี้เองกรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ ก็ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสอีกต่อไป

จากประวัติการแปลงแกนที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าทุกคนมีความพยายามที่จะกำจัดค่าความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนของโรเตอร์ เพื่อให้การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีความง่ายขึ้นนั่นเอง

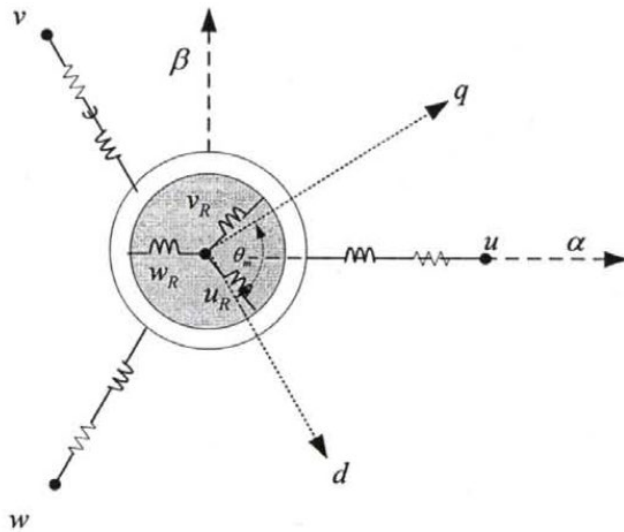
2.5.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปสเปซเวกเตอร์¹⁵

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือแบบจำลองพลวัต (Dynamic model) ซึ่งประกอบด้วยชุดของสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น

¹⁴ Paul C.Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, 1987.

¹⁵ จีรพงษ์ จิตตะโคตร, 2550, "การพัฒนาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบปรับความเร็วรอบโดยการปรับแรงดันความถี่โดยดีเอสพี" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 103 หน้า

(Non-linear system of differential equation) ที่สร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การนำเสนอในรูปแบบสเปซเวกเตอร์เป็นวิธีที่ง่ายและมีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์รองรับ นอกจากนี้ยังสามารถสื่อความหมายทางกายภาพได้ค่อนข้างชัดเจน ซึ่งในการใช้วิธีสเปซเวกเตอร์นั้นจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของมุมของเวกเตอร์ที่จะใช้ในการแปลงแกนอ้างอิงต่างๆ จากสมการที่ (2.4) – (2.6) เป็นการแสดงแรงดันและกระแสต่างๆ ในรูปของสเปซเวกเตอร์



รูปที่ 2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \quad (2.4)$$

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.5)$$

$$i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0 \quad (2.6)$$

และจากความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในรูปแบบของสเปซเวกเตอร์ดังสมการที่ (2.7)

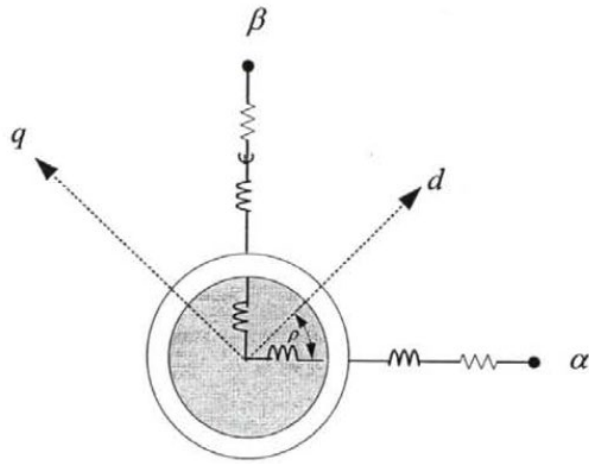
– (2.8) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

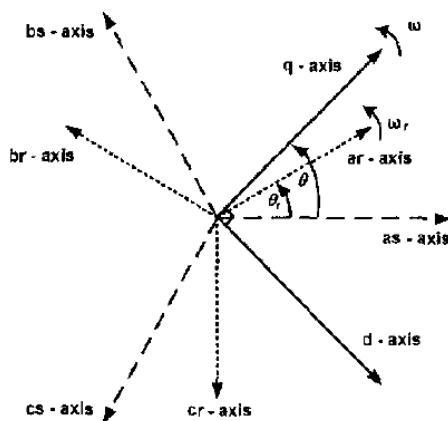
โดยที่ $\alpha - \beta$ คือแกนอ้างอิงสเตเตอร์ เราสามารถเขียนโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำใหม่เสมือนกับมีขดลวดเพียงสองขด ($\alpha - \beta$) ที่ตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 เฟส

2.5.3 การแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc มายังระบบ 2 เฟส d-q ¹⁶

สำหรับการสร้างแบบจำลองพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้วิธีการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc มาเป็นระบบ 2 แกน d-q หรือเรียกว่า (Clarke's Transformation) และให้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ ซึ่งวิธีนี้จะเปลี่ยนความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนของโรเตอร์มาเป็นความเหนี่ยวนำในรูปของฟลักซ์ที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของแกน d-q ทำให้การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความง่ายขึ้น



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 3 เฟส abc กับปริมาณ 2 เฟส d-q

¹⁶ Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, 1998

เราสามารถเขียนสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปของแกน d-q โดยให้แกนดังกล่าวหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ หรือเรียกอีกอย่างว่ากรอบอ้างอิงอิสระ โดยความสัมพันธ์ระหว่างแกน abc กับแกน d-q แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และกำหนดให้ ω เป็นความเร็วเชิงมุมในการหมุนของแกน d-q และหมุนในทิศทางเดียวกับโรเตอร์

กรอบอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงแกนมายังระบบ 2 แกน d-q จะมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ โดยเราสามารถกำหนดประเภทของกรอบอ้างอิงได้โดยการกำหนดค่าของ ω ให้มีค่าต่างๆ ดังนี้

$\omega = \omega$: กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame)

$\omega = 0$: กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame)

$\omega = \omega_r$: กรอบอ้างอิงโรเตอร์ (rotor Reference Frame)

$\omega = \omega_e$: กรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronously rotating reference frame)

ซึ่งกรอบอ้างอิงแต่ละแบบก็จะมีประโยชน์ในการใช้งานที่แตกต่างกันไป สำหรับปริมาณ 3 เฟส abc สามารถแปลงให้อยู่ในรูปปริมาณ 2 เฟส d-q โดยใช้หลักการของการเท่ากันระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของทั้ง 2 ระบบ โดยให้กระแสจากปริมาณ 3 เฟส abc กับกระแสจากปริมาณ 2 เฟส d-q มีค่าเท่ากันและเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดเพื่อให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กยังคงเท่ากัน สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 3 เฟส abc และปริมาณ 2 เฟส d-q

$\omega = \omega$: กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) กรอบอ้างอิงนี้กำหนดให้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วใดๆ โดยกำหนดค่าที่ ω ซึ่งค่า ω นี้สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวก ลบ หรือแม้แต่ค่าที่แปรเปลี่ยนได้

$\omega = 0$: กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame) กรอบอ้างอิงนี้มีค่า $\omega = 0$ หมายถึง แกน d-q ถูกยึดติดอยู่กับสเตเตอร์ ทำให้มุม θ มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงทำให้แกน q ทับแกนแรงเคลื่อนแม่เหล็กของเฟส a พอดี

$\omega = \omega_r$: กรอบอ้างอิงโรเตอร์ (rotor Reference Frame) กรอบอ้างอิงนี้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วโรเตอร์ กำหนดการทำงานของกรอบอ้างอิงนี้ได้โดยการให้ ω มีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมที่โรเตอร์ ω_r

$\omega = \omega_e$: กรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronously rotating reference frame) กรอบอ้างอิงนี้ แกน d-q หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยการกำหนดให้ $\omega = \omega_e$

2.5.4 ระบบแรงดันไฟฟ้า

สำหรับระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) แบบสมมูลนั้น สามารถแปลงเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสบนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame) ได้ตามรูปแบบทั่วไปดังแสดง

ในสมการ(2.10) ระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลงจะทำให้ค่าอ้างอิงศูนย์ (Zero sequence) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถแสดงองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงนี้ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าสามเฟสมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$v_a = V_m \cos \omega t \quad (2.11)$$

$$v_b = V_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.12)$$

$$v_c = V_m \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.13)$$

2.5.5 ระบบกระแสไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.14) แสดงถึงรูปแบบทั่วไปของการแปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสบนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame) ดังนั้นจึงได้นำมาประยุกต์เข้ากับระบบกระแสไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

ถ้ากระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมดุลงโดยมีมุมห่างกันแต่ละเฟสเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า จะทำให้ผลรวมของกระแสไฟฟ้าทุกเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ในสมการ(2.14) กระแสไฟฟ้าในแกนศูนย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถพิจารณาสมการ (2.14) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

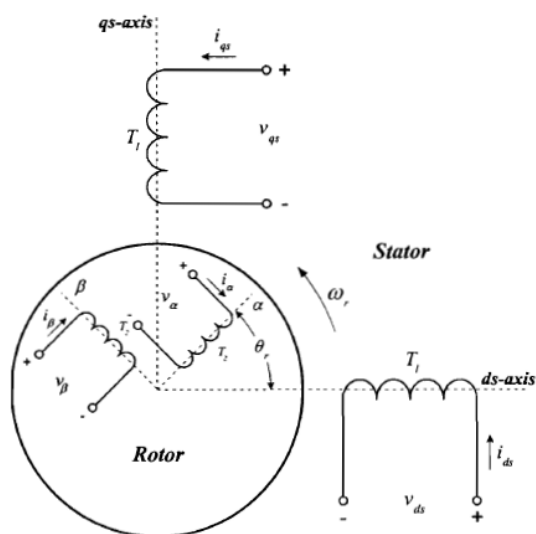
2.5.6 ระบบกำลังไฟฟ้า

การหาค่ากำลังไฟฟ้าสามารถหาจากองค์ประกอบของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ซึ่งต้องมีค่าตัวประกอบ $\frac{3}{2}$ คูณเข้าไป เพื่อรักษากำลังไฟารวมให้มีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส ซึ่งสามารถแสดงสมการกำลังไฟฟ้าได้จาก

$$P_e = \frac{3}{2}(i_\alpha v_\alpha + i_\beta v_\beta) \quad (2.16)$$

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นสมการพื้นฐานของการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้หลักการวิเคราะห์วงจรสมมูลบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือมีความง่าย สะดวกต่อการวิเคราะห์ทั้งการทำงานในเงื่อนไขของสภาวะคงตัวและสภาวะพลวัต รูปแบบทั่วไปของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Kron's Primitive Machine ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส¹⁷

ที่มา : อนุรักษ์ พันธ์คง, 2545

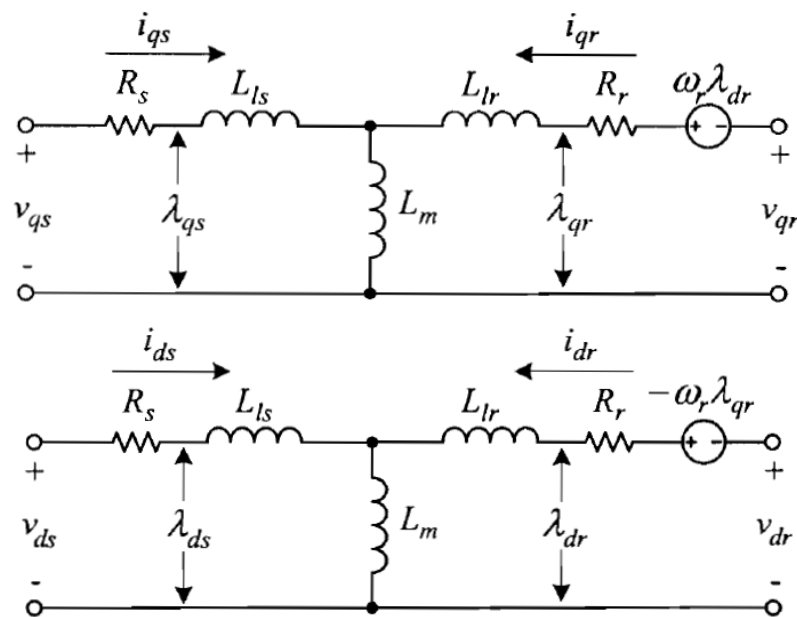
จากรูปที่ 2.11 แสดงถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวิเคราะห์แบบ Kron's Primitive Machine ที่อาศัยขดลวดตัวนำจำนวน 4 ขด นำมาสร้างสมการ ซึ่งมีขดลวดตัวนำ 2 ขด ในแนวแกน

¹⁷ อนุรักษ์ พันธ์คง, 2554 "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแรงบิดโดยตรงบนพื้นฐานสเปกตรัมมอดูลาร์โดยใช้ตัวอินทิเกรตที่ปรับตัวได้" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 84 หน้า

อ้างอิง α และขดลวดตัวนำอีก 2 ขด ในแนวแกนอ้างอิง β หลังจากการสร้างแบบจำลองของ Primitive Machine แล้วจึงนำทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบทั่วไปมาใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ซึ่งจะได้รูปแบบเมทริกซ์สมการแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{r\alpha} \\ v_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) สามารถนำมาแปลงเป็นวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงเทียบกับสเตเตอร์ (Clarke's Transformation) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงกับสเตเตอร์

วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำรูปที่ 2.12 กำหนดให้วงจรสมมูลทางด้านขดลวดสเตเตอร์แทนด้วย “s” และวงจรสมมูลทางด้านขดลวดโรเตอร์แทนด้วย “r” สามารถวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

สมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์
สเตเตอร์

$$v_{qs} = i_{qs} R_s + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (2.18)$$

$$v_{qr} = i_{qr} R_r + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} - \omega_r \lambda_{dr} \quad (2.19)$$

$$v_{ds} = i_{ds} R_s + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (2.20)$$

โรเตอร์

$$v_{dr} = i_{dr} R_r + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \omega_r \lambda_{qr} \quad (2.21)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + (i_{qs} + i_{qr}) L_m \quad (2.22)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + (i_{qr} + i_{qs}) L_m \quad (2.23)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + (i_{ds} + i_{dr}) L_m \quad (2.24)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + (i_{ds} + i_{dr}) L_m \quad (2.25)$$

และเมื่อกำหนดให้ $L_s = L_{ls} + L_m$ เป็นค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์

$L_r = L_{lr} + L_m$ เป็นค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_m & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.26) จะเห็นได้ว่าเชิงเส้น (Non-linear Equation) ขึ้นอยู่กับเวลาและมีหลายตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ดังนั้นการแก้สมการเหล่านี้จะวิเคราะห์จากการควบคุมแบบใหม่ (Modern Control) โดยใช้สมการสถานะ (State Equation) ในการแก้ปัญหา ซึ่งจะจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2.27)$$

$$Y = CX + DU \quad (2.28)$$

เมื่อทำการแก้สมการระหว่างสมการที่ (2.27) และ (2.28) จะได้ว่า

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1} B + D] U(s) \quad (2.29)$$

และสามารถหาฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ของระบบได้คือ

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1} B + D \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) ค่า v_{dr} และ v_{qr} จะเท่ากับศูนย์เนื่องจากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก ขดลวดทางด้านโรเตอร์จะถูกต่อถึงกันหมด (Short Circuit) ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของสเตตได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_s L_r & -\omega_r L_m^2 & R_r L_m & -\omega_r L_r L_m \\ \omega_r L_m^2 & -R_s L_r & \omega_r L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & \omega_r L_s L_m & -R_r L_s & \omega_r L_r L_s \\ -\omega_r L_s L_m & R_s L_m & -\omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

จากแก้สมการที่ (2.30) และ (2.31) เพื่อหาสมการฟังก์ชันโอนย้าย $G(s) = Y(s)/U(s)$ ของตัวแปร i_{qs}/v_{qs} และ i_{ds}/v_{ds} นั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$G(s) = \frac{i_{qs}(s)}{v_{qs}(s)} = \frac{i_{ds}(s)}{v_{ds}(s)} = \frac{num(s)}{den(s)} \quad (2.32)$$

โดยที่ค่าของ

$$num(s) = (L_r L_s - L_m^2) L_r s^3 + [L_r (L_r R_s + R_r L_s) + R_r (L_r L_s - L_m^2)] s^2 + [L_r \omega_r^2 (L_r L_s - L_m^2) + 2R_s R_r L_r + R_r^2 L_s] s + L_r^2 R_s \omega_r^2 + R_s R_r^2 \quad (2.33)$$

$$den(s) = (L_r L_s - L_m^2)^2 s^4 + 2(L_r L_s - L_m^2) (L_r R_s + R_r L_s) s^3 + [(L_r R_s + R_r L_s)^2 + (L_r L_s - L_m^2) (2R_s R_r + \omega_r^2 (L_r L_s - L_m^2))] s^2 + 2[L_r R_s \omega_r^2 (L_r L_s - L_m^2) + R_s R_r (L_r R_s + R_r L_s)] s + L_r^2 R_s^2 \omega_r^2 + R_s^2 R_r^2 \quad (2.34)$$

โดยทั่วไปแล้ว มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นแบบสมมาตร ดังนั้นสามารถหาค่าแรงบิด (Torque) ได้จากสมการ

$$\vec{T}_e = \frac{3}{2} P \vec{\lambda}_s \times \vec{i}_s \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) สามารถเขียนใหม่ในรูปของสมการแรงบิดทางกลจากความสัมพันธ์ขององค์ประกอบกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์บนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ได้ดังต่อไปนี้

$$T_e = \frac{3}{2} p_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (2.34)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบของสมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงานในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำได้จาก

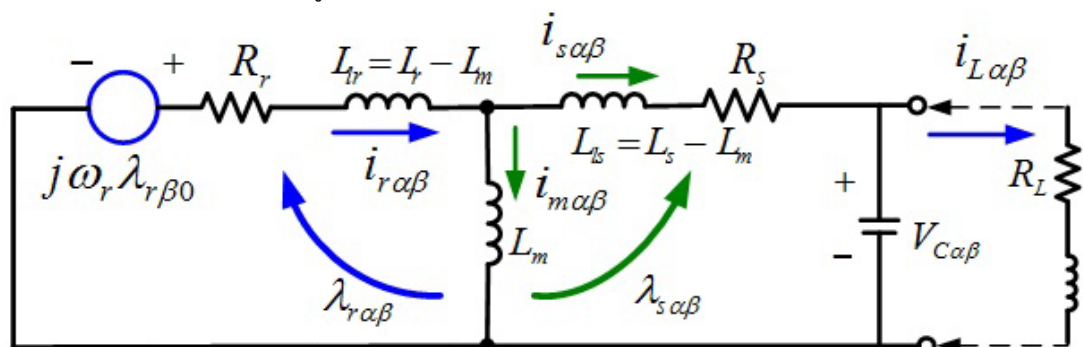
$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_m \quad (2.35)$$

สมการกำลังไฟฟ้าทางกลเมื่อทำงานในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือความต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้จาก

$$P_m = T_e \omega_m \quad (2.36)$$

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวจะมีลักษณะของการวิเคราะห์เช่นเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จะมีข้อแตกต่างในส่วนของการต่อชุดตัวเก็บประจุทางด้านขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งชุดตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่กระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับจ่ายให้กับชุดโหลด และการที่จะให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะต้องมีชุดตัวขับเคลื่อนกำลังมาขับให้โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ Kron's Primitive Machine เช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.13 สังเกตว่าทางขดลวดด้านสเตเตอร์จะถูกต่อเข้ากับชุดตัวเก็บประจุและทางด้านปลายขดลวดโรเตอร์จะถูกต่อรวมกันลักษณะการต่อคล้ายกับการลัดวงจร ซึ่งในรูปที่ 2.13 สามารถวิเคราะห์เพื่อแสดงรายละเอียดให้อยู่ในรูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส

รูปที่ 2.13 เป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ในสภาวะไร้โหลด ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเงื่อนไขที่จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถกระตุ้นตัวเองได้นั้นจะต้องมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ในตัวขดลวดโรเตอร์และตัวเก็บประจุที่นำมาต่อเข้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์จะต้องมีขนาดเหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 ขณะที่ยังไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุและโหลดนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถแสดงสมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแกนอ้างอิงหนึ่ง ($\alpha\beta$) ได้จาก

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองนั้น จะต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุได้จาก

$$V_{C\alpha} = \frac{1}{C} \int i_{C\alpha} dt + V_{C\alpha 0} \quad (2.38)$$

$$V_{C\beta} = \frac{1}{C} \int i_{C\beta} dt + V_{C\beta 0} \quad (2.39)$$

โดยที่ $V_{C\alpha 0}$ และ $V_{C\beta 0}$ คือค่าองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) ตามลำดับ และในขดลวดโรเตอร์นั้นจะมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ในตัวโรเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงสมการทางฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองได้จาก

$$\lambda_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} + \lambda_{r\alpha 0} \quad (2.40)$$

$$\lambda_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} + \lambda_{r\beta 0} \quad (2.41)$$

โดย $\lambda_{r\alpha 0}$ และ $\lambda_{r\beta 0}$ เป็นองค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกค้างในแกนโรเตอร์ เมื่อมีพลังงานทางกลจากตัวขับเคลื่อนกำลังมาขับให้ขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุน จะทำให้สร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้มาจากแม่เหล็กตกค้างภายในตัวขดลวดโรเตอร์ โดยเขียนสมการได้เป็น

$$\omega_r \lambda_{r\alpha} = \omega_r L_m i_{s\alpha} + \omega_r L_r i_{r\alpha} + \omega_r \lambda_{r\alpha 0} \quad (2.42)$$

$$\omega_r \lambda_{r\beta} = \omega_r L_m i_{s\beta} + \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r \lambda_{r\beta 0} \quad (2.43)$$

ดังนั้นสามารถแสดงรูปแบบสมการทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ในเงื่อนไขที่ยังไม่ได้ต่อโหลด ซึ่งได้วิเคราะห์มาจากสมการที่ (2.37) ถึง (2.43) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \\ \omega_r \lambda_{r\beta 0} \\ -\omega_r \lambda_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

โดยสมการที่ (2.44) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเตต (State equation) ได้เป็น กำหนดให้

$$ApI_G + BI_G + V_G = 0 \quad (2.45)$$

$$A = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix}, I_G = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, V_G = \begin{bmatrix} V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \\ \omega_r \lambda_{r\beta 0} \\ -\omega_r \lambda_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

จากสมการที่ (2.46) ใช้หลักการเมทริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) ในการแก้สมการ เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

$$pI_G = -A^{-1}BI_G - A^{-1}V_G \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} pi_{s\alpha} \\ pi_{s\beta} \\ pi_{r\alpha} \\ pi_{r\beta} \end{bmatrix} = L_\sigma \left(\begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r L_m^2 & R_r L_m & \omega_r L_r L_m \\ -\omega_r L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_r L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_r L_s L_r \\ \omega_r L_s L_m & R_s L_m & \omega_r L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_r V_{C\alpha} + L_m \omega_r \lambda_{r\beta 0} \\ -L_r V_{C\beta} - L_m \omega_r \lambda_{r\alpha 0} \\ L_m V_{C\alpha} - L_s \omega_r \lambda_{r\beta 0} \\ L_m V_{C\beta} + L_s \omega_r \lambda_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \right) \quad (2.48)$$

$$\text{กำหนดให้ } L_\sigma = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}$$

เมื่อต่อโหลดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยพิจารณาจากวงจรสมมูล ในรูปที่ 2.13 สามารถที่จะวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดได้ดังนี้

$$i_{C\alpha} = i_{s\alpha} - i_{L\alpha} \quad (2.49)$$

$$i_{C\beta} = i_{s\beta} - i_{L\beta} \quad (2.50)$$

$$v_{L\alpha} = R_L i_{L\alpha} + L_L pi_{L\alpha} \quad (2.51)$$

$$v_{L\beta} = R_L i_{L\beta} + L_L pi_{L\beta} \quad (2.52)$$

พิจารณาสมการที่ (2.51) และ(2.52) จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหนด ซึ่งเขียนในรูปสมการอนุพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อโหนดได้เป็น

$$pv_{L\alpha} = \frac{1}{C}(i_{s\alpha} - i_{L\alpha}) \quad (2.53)$$

$$pv_{L\beta} = \frac{1}{C}(i_{s\beta} - i_{L\beta}) \quad (2.54)$$

และใช้สมการที่ (2.53) และ (2.54) ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหนด ดังนั้นสามารถเขียนสมการอนุพันธ์กระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$pi_{L\alpha} = \frac{1}{L_L}(v_{L\alpha} - R_L i_{L\alpha}) \quad (2.55)$$

$$pi_{L\beta} = \frac{1}{L_L}(v_{L\beta} - R_L i_{L\beta}) \quad (2.56)$$

จากการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยอาศัยสมการที่ได้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดดังกล่าวไว้ข้างต้นในการอธิบายถึงพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ซึ่งสามารถที่จะนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณการทำงานในสภาวะชั่วขณะและสภาวะคงตัว

2.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อทำการต่อโหนดในลักษณะการต่อแบบแยกเดี่ยวเข้ากับขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ค่าความเหนี่ยวนำร่วม และค่ากระแสกระตุ้น ไม่สามารถที่จะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ได้เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทั่วไป เพราะจะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและทำให้เกิดการอิมตัวในแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อันจะส่งผลโดยตรงต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งในสภาวะพลวัตและสภาวะคงตัว

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยอาศัยหลักการทดสอบแบบไร้โหนด (No-load test) ค่ากระแสกระตุ้นสามารถคำนวณได้จาก

$$I_m = \sqrt{(i_{s\alpha} + i_{r\alpha})^2 + (i_{s\beta} + i_{r\beta})^2} \quad (2.57)$$

โดยสัญลักษณ์จุด “.” เป็นการแสดงค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นที่ใช้ทดสอบค่าต่างๆ และจะใช้หลักการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting)

อธิบายลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว ด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับที่ 4 เพื่อยืนยันถึงความถูกต้องของค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ตามโดยสมการดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จาก

$$L_m = -15.28I_m^4 + 34.45I_m^3 - 28.08I_m^2 + 8.473I_m + 0.698 \quad (2.58)$$

ในสมการที่ (2.58) ได้แสดงการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้น เพื่อที่จะนำไปสร้างแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับกระแสกระตุ้นทำงานอย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่สภาวะปกติจนถึงสภาวะอิ่มตัว

2.9 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ประสิทธิภาพสามารถหาได้จากวิธีการเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ ค่ากำลังงานกลอินพุต จะได้มาจากค่ารวมของความสูญเสียทางไฟฟ้า ความสูญเสียทางกล และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.9.1 ความสูญเสียทางไฟฟ้า

จะประกอบด้วยความสูญเสียต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ความสูญเสียทางไฟฟ้าสามเฟสของขดลวดที่สเตเตอร์

$$P_{cu, stator} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.59)$$

โดยที่ R_1 = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (โอห์ม)

I_1 = กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (แอมป์)

2) ความสูญเสียทางไฟฟ้าสามเฟสของขดลวดที่โรเตอร์

$$P_{cu, rotor} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.60)$$

โดยที่ R_2 = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (โอห์ม)

I_2 = กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (แอมป์)

2.9.2 ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กที่สเตเตอร์

1) Hysteresis Loss

เป็นความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากคุณสมบัติของแกนเหล็กมีสนามแม่เหล็กตกค้าง ดังนั้นการกลับทิศสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนเข้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดความสูญเสียที่เกิดจาก Hysteresis Loss ของความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic flux density (B) กับ Magnetic field intensity (H) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียโดยประมาณจาก

2) Eddy Current Loss

การหาประสิทธิภาพ η ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$\text{Effency: } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.61)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses} \quad (2.62)$$

โดยที่

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu, stator} + P_{cu, rotor} \quad (2.63)$$

2.10 การควบคุมแบบเวกเตอร์ปรับตัวได้ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล

2.10.1 การควบคุมแบบเวกเตอร์

ในส่วนของการควบคุมแบบเวกเตอร์¹⁸ จะควบคุมเวกเตอร์กระแส 3 เฟสที่ป้อนให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (a,b,c) ถูกเปลี่ยนให้เป็นเวกเตอร์กระแสในระบบ 2 แกน ซึ่งตั้งฉากกันตลอดเวลา (d,q) โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เวกเตอร์กระแสแกนหนึ่งมีทิศไปทางเดียวกับ

¹⁸ ถนัด เหลืองนฤทัย, 2543, “ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์” บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 101 หน้า

สนามแม่เหล็กตลอดเวลา เรียกว่า Magnetizing current component (i_d) และเวกเตอร์กระแสอีกแกนหนึ่งมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลาเรียกว่า Torque current component (i_q) เวกเตอร์กระแสในแกน d มีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลาเป็นตัวแทนของกระแสสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็ก ในขณะที่เวกเตอร์กระแสในแกน q มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลาเป็นตัวแทนของกระแสสำหรับกำหนดแรงบิดของมอเตอร์ ผลที่ได้สามารถควบคุมสนามแม่เหล็กให้คงที่ในระดับที่พอเหมาะ จึงไม่มีปัญหาเรื่องการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก รวมทั้งสามารถลดปริมาณสนามแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความเร็วรอบให้เกินความเร็วพิทัก (Field weakening) ขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมแรงบิดได้โดยตรงและเป็นอิสระจากการควบคุมสนามแม่เหล็ก การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์จึงสามารถเลือกจุดทำงานที่ดีที่สุด โดยตอบสนองที่ดีกว่าทั้งในช่วงทำงานชั่วคราวและช่วงการทำงานคงตัว สมรรถนะที่ดีในช่วงความเร็วต่ำ

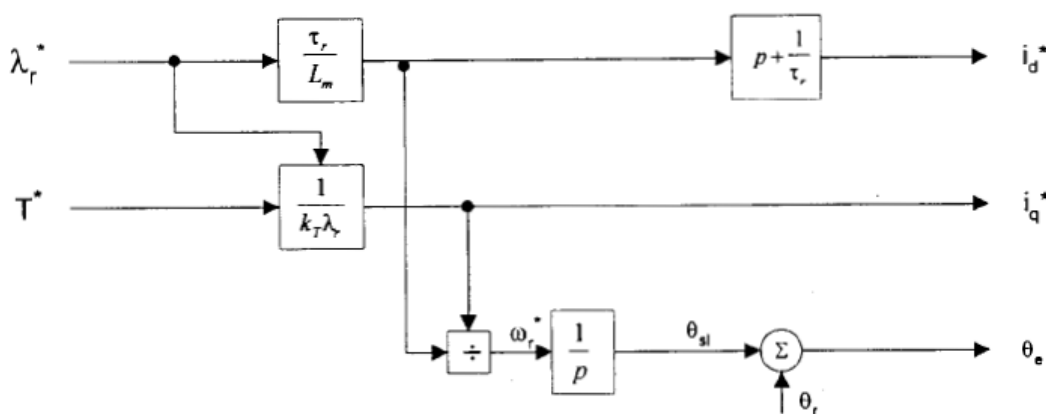
ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) ต้องคำนึงถึงโหลดซึ่งมีผลต่อการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งจำเป็นต้องคำนวณและควบคุมขนาดพร้อมทิศทางของเวกเตอร์กระแส (หรือแรงดัน) อยู่ตลอดเวลา โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์จะรับคำสั่ง (Input command) สองประการคือ คำสั่งสนามแม่เหล็ก (Flux command) และคำสั่งแรงบิด (Torque command) ซึ่งจะผ่านมาจากปริมาณกระแสคำสั่ง i_d^* และ i_q^* ตามลำดับ (ปริมาณที่มีสัญลักษณ์ * หมายถึงปริมาณคำสั่ง) แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อทำการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดดังกล่าว โดยมีสัญญาณที่ป้อนกลับจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งอาจจะเป็นแรงดัน กระแส และ/หรือความเร็วรอบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบว่าจะอ้างอิงอยู่กับปัจจัยใดบ้าง

สนามแม่เหล็กที่อ้างอิงเพื่อเป็นสนามแม่เหล็กอ้างอิงอาจหมายถึง สนามแม่เหล็กในโรเตอร์ (Rotor flux) สนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ (Stator flux) หรือสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Airgap flux) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจะจัดรูปสมการให้อ้างอิงอยู่บนแกนสนามแม่เหล็กใดดังที่กล่าวไว้แล้ว ในกรอบอ้างอิง โดยทั้ง 3 สนามมีความสัมพันธ์กัน การอ้างอิงสนามใดสนามหนึ่งสามารถสัมพันธ์ไปยังแรงบิดที่เกิดขึ้นบนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นในการควบคุมแบบเวกเตอร์ถ้าจะพิจารณาโดยอาศัยการเลือกสนามแม่เหล็กอ้างอิงแล้วสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

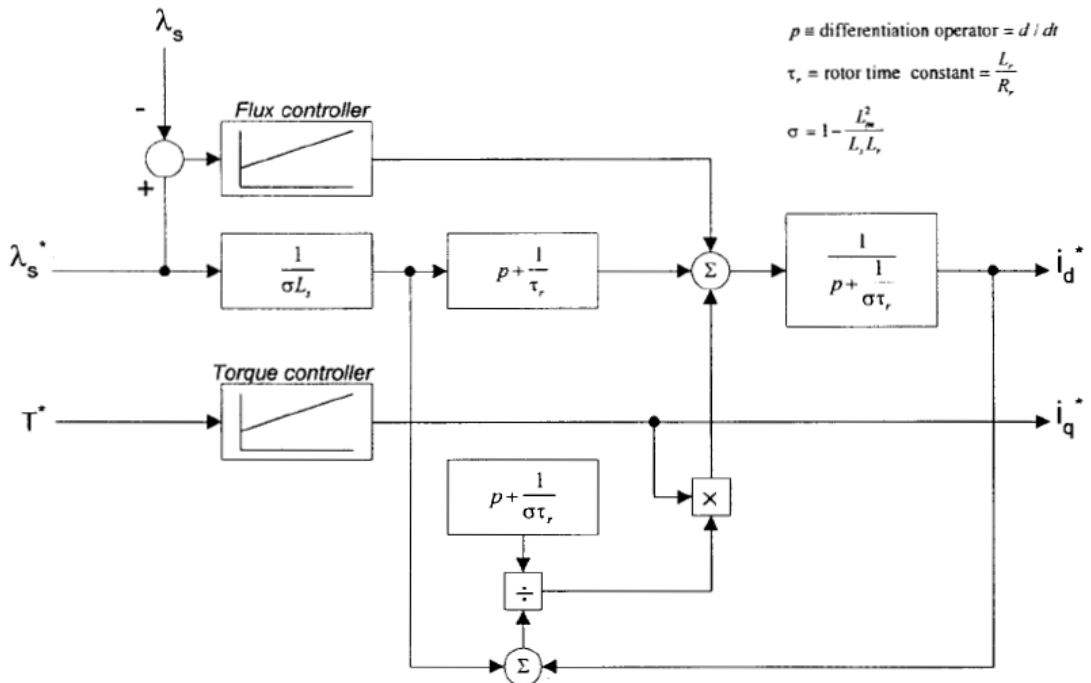
1. การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามโรเตอร์ (Rotor flux orientation) ดังรูปที่ 2-14 วิธีนี้สามารถทำการพัฒนาได้คล่องตัวที่สุดถึงแม้ว่าจะมีขั้นตอนในการคำนวณมากกว่าการเลือกสนามอ้างอิงอื่นบ้างก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแรงบิดและความเร็วรอบเป็นปริมาณที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงอยู่บนด้านโรเตอร์จะสามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ตรงไปตรงมาที่สุด ในขณะที่ขั้นตอนการคำนวณที่มากกว่าเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม

2. การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามสเตเตอร์ (Stator flux orientation) ดังรูปที่ 2-15 จากที่กล่าวไว้แล้วในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถกระทำได้ทางเดียวคือการบังคับปริมาณไฟฟ้า 3 เฟสที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนมุมมองในทางคณิตศาสตร์ไปอย่างไรก็ตาม สุดท้ายก็ต้องมาจบที่ปริมาณไฟฟ้า 3 เฟส ที่ขดลวดสเตเตอร์เช่นเดิม ดังนั้นถ้าสมการทั้งหลายที่ใช้ในระบบควบคุมอ้างอิงอยู่ทางด้านสเตเตอร์อยู่แล้ว จะทำให้สามารถลดความซับซ้อนการคำนวณลงได้ แต่กลับมีความซับซ้อนของโครงสร้างทางคณิตศาสตร์มากขึ้น เนื่องจากสมการของสนามสเตเตอร์กับแรงบิดซึ่งอ้างอิงบนด้านสเตเตอร์จะมีความสัมพันธ์กันอยู่ไม่เป็นอิสระต่อกันอย่างแท้จริง
3. การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามในช่องว่างอากาศ (Air-gap flux orientation) ดังรูปที่ 2-16 มีลักษณะคล้ายกับการอ้างอิงสนามสเตเตอร์ ต่างกันที่โครงสร้างทางคณิตศาสตร์เพียงเล็กน้อย

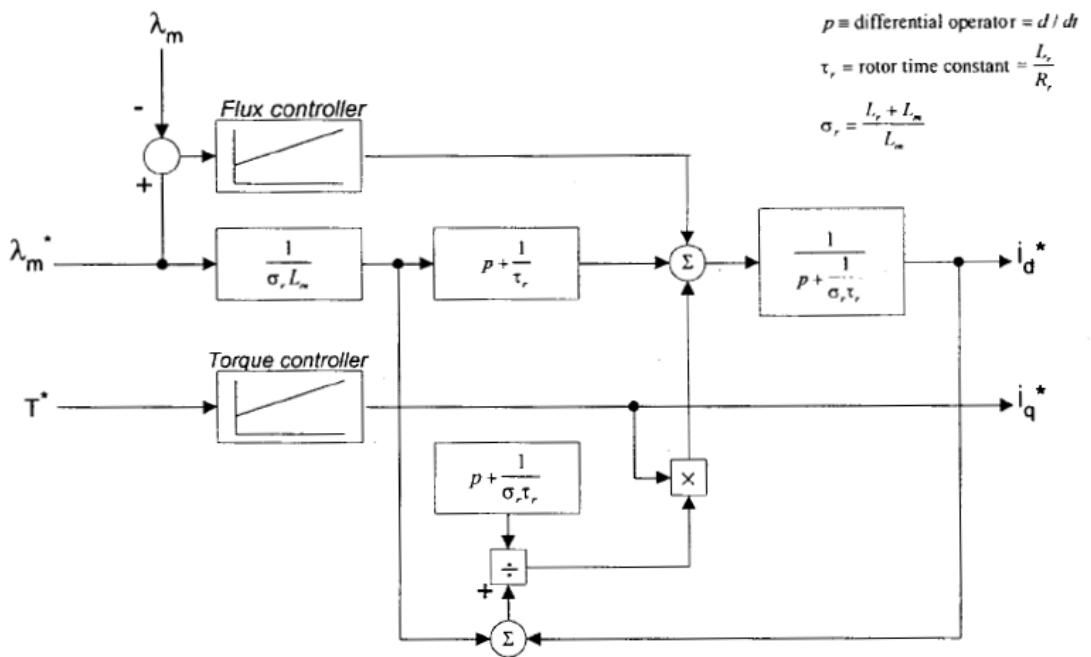
การพิจารณาแนวทางของระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ นอกจากสามารถพิจารณาจากการเลือกแกนสนามแม่เหล็กอ้างอิงใน 3 แนวทางดังที่กล่าวมาแล้ว ในแต่ละแนวทางยังสามารถแยกออกเป็นอีก 2 ประเภท ตามวิธีการเพื่อให้ได้มาซึ่งมุมของสนามแม่เหล็ก คือ การตรวจวัดสนามแม่เหล็ก คือ การตรวจวัดสนามแม่เหล็กโดยวิธีตรง และการตรวจวัดสนามแม่เหล็กโดยวิธีอ้อม อย่างไรก็ตาม การเลือกอ้างอิงแกนสนามโรเตอร์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากข้อดีดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้นจึงขอเสนอเฉพาะตัวอย่างโครงสร้างของการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยอ้างอิงสนามโรเตอร์ด้วยวิธีตรง และการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยอ้างอิงสนามโรเตอร์ด้วยวิธีอ้อม



รูปที่ 2-14 ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามโรเตอร์



รูปที่ 2-15 ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามสเตเตอร์



รูปที่ 2-16 ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยวิธีอ้างอิงสนามในช่องว่างอากาศ

1. การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยอ้างอิงสนามโรเตอร์ด้วยวิธีตรง (Vector control system with direct rotor flux orientation) วิธีการนี้จะทำการตรวจวัดสนามแม่เหล็กโรเตอร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดมุมและปริมาณสนามแม่เหล็กได้โดยตรง แต่ก็มีขีดจำกัดที่ ความถี่หรือความเร็วรอบต่ำ และการต้องมีการปรับเปลี่ยน (Modify) โครงสร้างภายใน ตัวมอเตอร์ด้วยจึงไม่สะดวกในทางปฏิบัติและที่สำคัญทำให้มอเตอร์เสีयरูปทรง (Trzynadlowski, 1994) ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่ได้รับความนิยมนักในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม
2. การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยอ้างอิงสนามโรเตอร์ด้วยวิธีอ้อม (Vector control system with indirect rotor flux orientation) วิธีการนี้จะทำการคำนวณมุมของสนามโรเตอร์ โดยใช้ความเร็วรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะไม่มีปัญหาในเรื่องความเร็วรอบต่ำถ้าเลือกวิธีการตรวจวัดความเร็วรอบที่เหมาะสม แต่ก็มีข้อเสียเนื่องจากการคำนวณเพื่อหามุมของสนามโรเตอร์ต้องอาศัยพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้าร่วมด้วย จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างเนื่องจากจุดทำงานที่เปลี่ยนไปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามเหตุผลสำคัญที่ทำให้การตรวจวัดมุมสนามแม่เหล็กโดยวิธีอ้อมนี้ได้รับความนิยมมากกว่าแบบวิธีตรงคือ ในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถทำได้ที่ภายนอกโครงสร้างของมอเตอร์ จึงไม่ทำให้โครงสร้างของมอเตอร์เสีयरูปทรง และมีความสะดวกมากกว่าในทางปฏิบัติ (Trzynadlowski, 1994)

นอกจากนี้ถ้าจะพิจารณาในรูปแบบของปริมาณไฟฟ้าที่ทำการควบคุมแล้วระบบควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ก็อาจจะแยกออกได้เป็นอีก 2 ลักษณะ คือ อาจพิจารณาได้ทั้งรูปของแรงดันหรือกระแส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบควบคุมว่าจะเลือกวงรอบการควบคุมกระแส (Current control) หรือวงรอบการควบคุมแรงดัน (Voltage control) การควบคุมกระแสถึงแม้จะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวแปร แต่สามารถแก้ไขได้โดยการปรับอัตราขยายวงรอบการป้อนกลับให้เหมาะสม แต่ก็มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ (โสภณ, 2538) ซึ่งจะสอดคล้องกับกรณีที่เลือกแกนอ้างอิงสนามแม่เหล็กเป็นสนามโรเตอร์ และถึงแม้วงรอบการควบคุมกระแสจะต้องการความเร็วในการตอบสนองสูงให้พอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างกระแส (i_d) และ (i_q) แต่ดิจิทัลชิคแนลโปรเซสเซอร์ที่เลือกใช้มีความเร็วพอที่จะทำให้ไม่เกิดปัญหาดังกล่าว

ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมโดยเลือกแกนอ้างอิงเป็นสนามโรเตอร์ สนามสเตเตอร์ หรือสนามในช่องว่างอากาศ ด้วยวิธีตรงหรือวิธีอ้อม วงรอบการควบคุมแบบกระแสหรือแรงดันก็ตาม ทั้งหมดเพื่อต้องการบรรลุวัตถุประสงค์สองประการตามหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Texas instrument, 1998) คือ

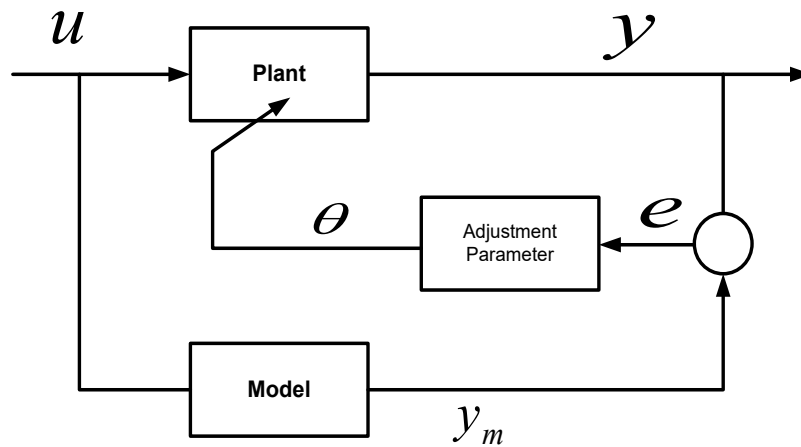
1. เพื่อควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดให้เป็นไปตามคำสั่ง
2. เป็นลักษณะการควบคุมแรงบิดโดยตรง

2.10.2 การควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Control)

การควบคุมแบบปรับตัวเป็นการควบคุมชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันลักษณะเด่นของการควบคุมชนิดนี้ คือ ตัวควบคุมจะทำการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมหรือคุณลักษณะของระบบเพื่อให้สนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการหรือสิ่งรบกวนจากภายนอกให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยที่การปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของระบบ สามารถกระทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ หรือขึ้นส่วนกลไกใดๆ ก็ตามที่ทำให้พารามิเตอร์ที่มีผลต่อระบบเปลี่ยนแปลงไป

โดยทั่วไปการควบคุมแบบปรับตัวจะประกอบด้วยลูป (Loop) ของการทำงาน 2 ส่วนเสมอ ลูปแรกเป็นลูปกระบวนการซึ่งเป็นลูปป้อนกลับ (Feedback) ทั่วๆ ไป จะประกอบด้วยตัวควบคุมและเครื่องจักรหรือพลานต์ (Plant) ส่วนลูปที่สองจะเป็นลูปปรับค่าตัวแปรของระบบ เนื่องจากการปรับค่าของพารามิเตอร์ จะใช้เวลาส่วนหนึ่งในการรับค่าตัวแปรต่างๆ และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสม ดังนั้นตามปกติแล้วลูปปรับค่าตัวแปรจึงทำงานช้ากว่าลูปของกระบวนการ โดยรูปแบบของการปรับตัวมีวิธีการปรับตัว (Adaptive Scheme) มากมายหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้กับงาน จึงขอยกตัวอย่างของวิธีการปรับตัวพื้นฐานบางวิธีการได้แก่ การควบคุมแบบตารางอัตราขยาย (Gain Scheduling) การควบคุมปรับตัวแบบอ้างอิงแบบจำลอง (Model – Reference Adaptive System, MRAS) และวิธีการบังคับตัวปรับค่า (Self-Tuning Regulator, STR) โดยในงานวิจัยนี้ เลือกใช้การควบคุมปรับตัวแบบอ้างอิงแบบจำลอง ซึ่งถือว่าเป็นต้นแบบของการควบคุมแบบปรับตัว ที่มีประสิทธิภาพสูงรูปแบบหนึ่ง เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบที่มีเสถียรภาพ โดยหลักการการทำงาน คือ ตัวควบคุมจะทำการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบจนกว่าระบบจะมีพฤติกรรมหรือให้อาท์พุท เหมือนกับแบบจำลอง (Model) ที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้น

การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองนี้ เป็นวิธีการควบคุมที่สำคัญชนิดหนึ่งของการควบคุมแบบปรับตัว โดยมีหลักในการปรับค่า คือ การทำให้ความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทที่ได้จากระบบที่ต้องการ (Plant) กับเอาท์พุทของแบบจำลอง (Model) หดไป ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 2-17 สมมุติให้อาท์พุทของแบบจำลองเป็น y_m เอาท์พุทของระบบเป็น y โดยที่ e เป็นความแตกต่างระหว่างเอาท์พุททั้งสอง (Error) และมีพารามิเตอร์ปรับค่า คือ θ



รูปที่ 2-17 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การปรับค่าพารามิเตอร์ (θ) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไป ทำได้โดยกำหนดให้ Loss function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2-64)$$

เมื่อต้องการให้ความแตกต่างของเอาต์พุตทั้งสองมีค่าน้อยที่สุด จะทำได้โดยการปรับพารามิเตอร์ปรับค่า ดังนั้น

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (2-65)$$

หรือ

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2-66)$$

โดยที่ $-\gamma$ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

สมการที่ (2-66) ถือว่าเป็นต้นกำเนิดของวิธีปรับตัวชนิด MRAS และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เรียกสมการที่ (2-66) นี้ว่า MIT rule และเรียก $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ ในสมการที่ (2-66) ว่า Sensitivity derivative หรือ Sensitivity function ของระบบ ซึ่ง $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ นี้เป็นตัวบ่งบอกถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ปรับค่า (θ) ที่มีต่อ Error ใดๆก็ตาม Loss function (J) อาจถูกกำหนดให้เป็นค่าต่างๆ ได้เพื่อความเหมาะสม เช่น

$$J(\theta) = |e| \quad (2-67)$$

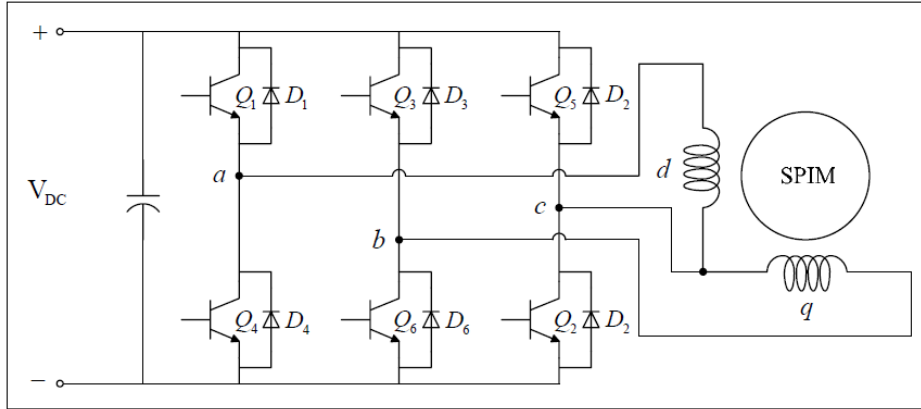
ดังนั้น

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma \operatorname{sign}\left(\frac{\partial e}{\partial \theta}\right) \operatorname{sign}(e) \quad (2-68)$$

สมการที่ (2-68) เรียกว่า Sign – sign algorithm

2.10.3 อินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม¹⁹

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส นิยมแปลงผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 18 ซึ่งจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพื่อใช้ในการควบคุมที่ทั้งขนาดและความถี่ เพื่อจะให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่สมดุลและมีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นในการควบคุมที่ง่ายและสะดวกจึงต้องใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่มีรูปคลื่นไซน์สามเฟส เพื่อใช้กับสัญญาณในการขับสวิตช์อินเวอร์เตอร์ให้ทำงาน ซึ่งจะเรียกวิธีการนี้ว่าอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะใช้เทคนิคคลื่นไซน์ตัดสามเหลี่ยม (Sinusoidal pulse width modulation: SPWM) ดังแสดงคลื่นแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 2-18 หลักการดังกล่าวมีข้อดีคือง่ายต่อการสร้างสัญญาณควบคุม จึงทำให้สะดวกและสามารถออกแบบวงจรกรองความถี่ทางด้านออกได้ง่ายและมีขนาดเล็ก



รูปที่ 2-18 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

โดยสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง คำนวณได้จาก

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_{dc}}{C} \quad (2-82)$$

¹⁹ วุชริน ศรีรัตนวิชัยกุล, 2552, การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 88 หน้า

ในการออกแบบจะกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมตัวเก็บประจุมีขนาดที่สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถที่จะคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการสวิตช์โดยใช้เทคนิคคลื่นไซน์ตัดคลื่นสามเหลี่ยม ได้จากสมการ

$$V_s = \sqrt{3}m_a \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (2-83)$$

ตัวดัชนีการมอดูเลต (m_a) จะถูกออกแบบให้มีค่าเป็น 1 ตลอดเวลา ซึ่งเป็นค่าที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดการสวิตช์เชิงเส้นและเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายออกมาได้มากที่สุด สามารถเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ผ่านการควบคุมจากอินเวอร์เตอร์ได้เป็น

$$d_a = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\omega t) \quad (2-84)$$

$$d_b = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-85)$$

$$d_c = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-86)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์จะต้องมีค่าเท่ากับ

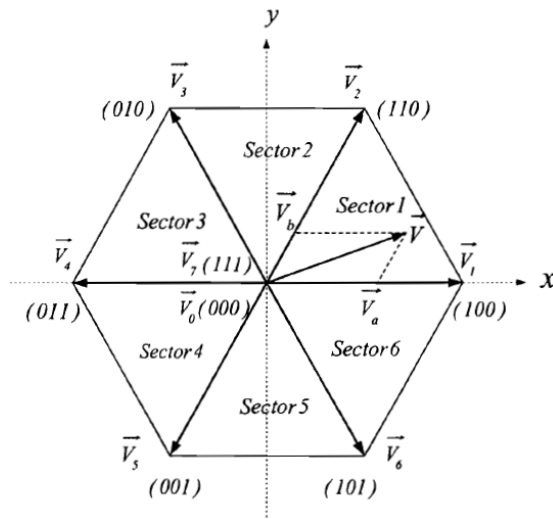
$$v_{an} = V_m \cos(\omega t) \quad (2-87)$$

$$v_{bn} = V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-88)$$

$$v_{cn} = V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-89)$$

2.10.4 หลักการสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชันแบบแรงดัน

หลักการสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน (Space vector pulse width modulation: SVM)แบบแรงดัน ได้มาจากการที่สนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้สำหรับการมอดูเลตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยเทคนิคนี้สามารถจะเปลี่ยนแปลงจากปริมาณสามเฟส (abc)ไปเป็นปริมาณสองเฟส (dq)จากองค์ประกอบสองเฟส จะทำให้เกิดขนาดของเวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์แปดสถานะและสามารถนำไปใช้หาการมอดูเลตของเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์ได้ การเคลื่อนที่ของสเปซเวกเตอร์จะเคลื่อนที่ไปตามที่แบ่งเป็นตอน (Section) ดังรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 การสเปซเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า

โดยสามารถแสดงองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในฟังก์ชันคลื่นไซน์ได้ดังนี้

$$v_a = V_m \sin \omega t \quad (2-90)$$

$$v_b = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (2-91)$$

$$v_c = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (2-92)$$

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนสามารถแสดงเป็นเวกเตอร์ลัพธ์ (\vec{V}) ของแรงดันไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ดังรูปที่ 2-19 การสเปซเวกเตอร์สามารถแสดงในรูปปริมาณไฟฟ้าสามเฟสได้ คือ

$$\vec{V} = v_\alpha + jv_\beta = \frac{2}{3}(v_a + av_b + a^2v_c) \quad (2-93)$$

เมื่อ $a = e^{j2\pi/3}$

$$|\vec{V}| = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad \text{และ} \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \quad (2-94)$$

ดังนั้น

$$v_\alpha + jv_\beta = \frac{2}{3}\left(v_a + \cos\frac{2\pi}{3}v_b + \cos\frac{2\pi}{3}v_c\right) + j\frac{2}{3}\left(\sin\frac{2\pi}{3}v_b - \sin\frac{2\pi}{3}v_c\right) \quad (2-95)$$

ทำการเปรียบเทียบส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ จะได้

$$\text{ส่วนจริง} \quad v_\alpha = \frac{2}{3}\left(v_a + \cos\frac{2\pi}{3}v_b + \cos\frac{2\pi}{3}v_c\right) \quad (2-96)$$

$$\text{ส่วนจินตภาพ} \quad v_\beta = \frac{2}{3}\left(\sin\frac{2\pi}{3}v_b - \sin\frac{2\pi}{3}v_c\right) \quad (2-97)$$

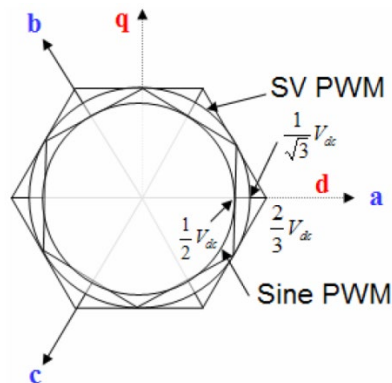
แสดงในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{2\pi}{3} \\ 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & -\sin \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2-98)$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2-99)$$

หลักการของสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูละชันนี้ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าคลื่นไซน์เกิดจากการที่เวกเตอร์ที่มีขนาดคงที่เคลื่อนที่ไปด้วยความถี่ที่ เทคนิคสเปซเวกเตอร์นี้จะอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (\vec{V}) โดยเป็นการรวมของรูปแบบการสวิตช์ที่แปดสถานะรูปแบบ (V_0 ถึง V_8) จากรูปที่ 2-20 แสดงวิธีการแปลงพิกัดเวกเตอร์สามเฟส (abc) เป็นสองเฟส (dq) เพื่อหาสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 2-20 พิกัดเวกเตอร์ระบบสามเฟสกับระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิง

การสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมอดูละชันมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การหาแรงดันไฟฟ้า v_d, v_q, \vec{V} และมุม ϕ

การหา v_d, v_q, \vec{V} และมุม ϕ จะต้องแปลงพิกัดสามเฟส (abc) เป็นพิกัดสองเฟส (dq)

แรงดันไฟฟ้าเวกเตอร์ในพิกัดสองเฟสแสดงในรูปที่ 2-20

$$v_d = v_{an} - v_{bn} \cos 60^\circ - v_{cn} \cos 60^\circ \quad (2-100)$$

$$= v_{an} - \frac{1}{2} v_{bn} - \frac{1}{2} v_{cn} \quad (2-101)$$

$$v_q = v_{bn} \cos 30^\circ - v_{cn} \cos 30^\circ \quad (2-102)$$

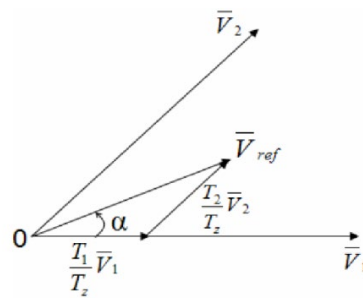
$$= \frac{\sqrt{3}}{2} v_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{cn} \quad (2-103)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (2-104)$$

$$|\vec{V}_{ref}| = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (2-105)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{v_d}{v_q} \right) = \omega_s t = 2\pi f_s t \quad (2-106)$$

2. การหาค่าช่วงเวลา T_1, T_2, T_0



รูปที่ 2-21 เวกเตอร์อ้างอิงที่เกิดจากการรวมของเวกเตอร์สองตัวในช่วง Section ที่ 1

จากรูปที่ 2-21 แสดงการหาค่าช่วงเวลาโดยได้ทำการยกตัวอย่างการหาค่าช่วงเวลา ในช่วง Section ที่ 1 ช่วง $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$ ซึ่งสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\int_0^{T_z} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \vec{V}_0 dt \quad (2-107)$$

เพราะฉะนั้น $T_z \cdot \vec{V}_{ref} = (T_1 \cdot \vec{V}_1 + T_2 \cdot \vec{V}_2)$ (2-108)

ดังนั้น $T_z \cdot |\vec{V}_{ref}| = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(0) \\ \cos(\pi/2) \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix}$ (2-109)

เพราะฉะนั้นช่วงเวลา T_1, T_2, T_0 จะมีค่าเท่ากับ

$$T_1 = T_z \cdot m_a \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin(\pi/3)} \quad (2-110)$$

$$T_2 = T_z \cdot m_a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\pi/3)} \quad (2-111)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (2-112)$$

กำหนดให้ $T_Z = \frac{1}{f_Z}$ และ $m_a = \frac{|\vec{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}}$

ดังนั้นสามารถที่จะหาช่วงเวลาการสวิตช์ที่ช่วง section ใดๆ ได้จาก

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \quad (2-113)$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi - \alpha \right) \quad (2-114)$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \pi \sin \alpha \right) \quad (2-115)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \quad (2-116)$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\vec{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\cos \alpha \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi + \sin \alpha \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right) \quad (2-117)$$

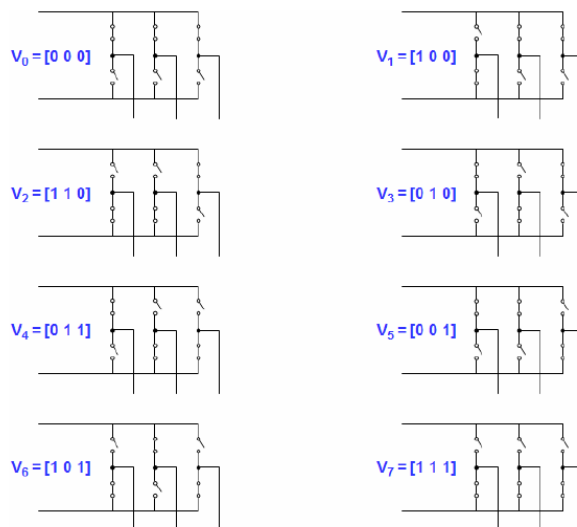
และ $T_0 = T_Z - T_1 - T_2$

กำหนดให้ n เท่ากับจำนวน 1 ถึง 6 แทนค่าแต่ละช่วง

3. หาค่าเวลาในการสวิตช์ของไอจีบีทีแต่ละตัว (ตั้งแต่ S_1 ถึง S_6)

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส เมื่อแต่ละเฟสเชื่อมต่อกันกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทางด้านบวกหรือด้านลบจะมีสถานะการทำงานเกิดขึ้นแปดสถานะ ดังเงื่อนไขของการสวิตช์ ดังรูปที่

2-22



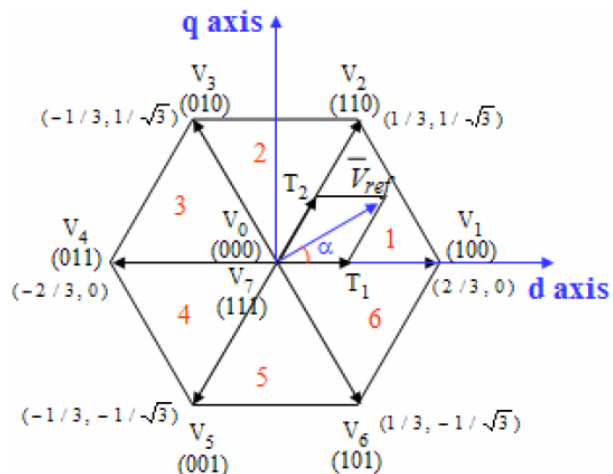
รูปที่ 2-22 รูปแบบวิธีการสวิตช์ในแต่ละ Section

ตารางที่ 2.1 สถานะของแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส (1= สถานะเปิด, 0=สถานะปิด)

Voltage Vectors	Switching Vectors			Line to neutral voltage			Line to line voltage		
	a	b	c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
V_2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
V_3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
V_4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
V_5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
V_6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

(Note that the respective voltage should be multiplied by V_{dc})

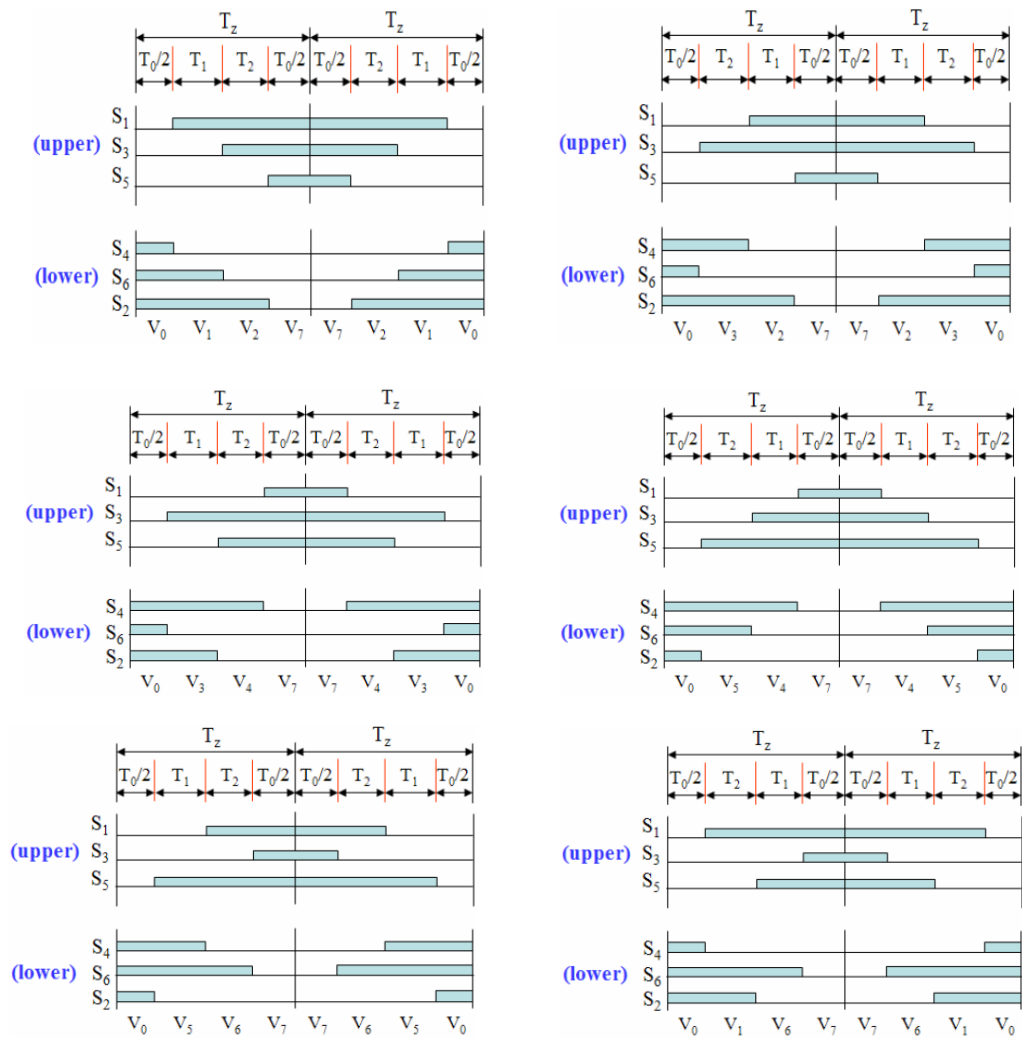
มุมมองของสเปสเวกเตอร์คือทำให้ค่าเฉลี่ยแต่ละสเปสเวกเตอร์เท่ากับแรงดันที่สร้างได้โดยวิธีการนี้จะสร้างได้ 8 รูปแบบคือ 100,010,001,011,101,110,111 และ 000 โดยที่รูปแบบของ 000 และ 111 เรียกว่า ซีโรเวกเตอร์ ส่วนรูปแบบที่เหลืออีก 6 รูปแบบเรียกว่าแอกทีฟเวกเตอร์ โดยสามารถนำแต่ละรูปแบบมาเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2-23



รูปที่ 2-23 แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดัน

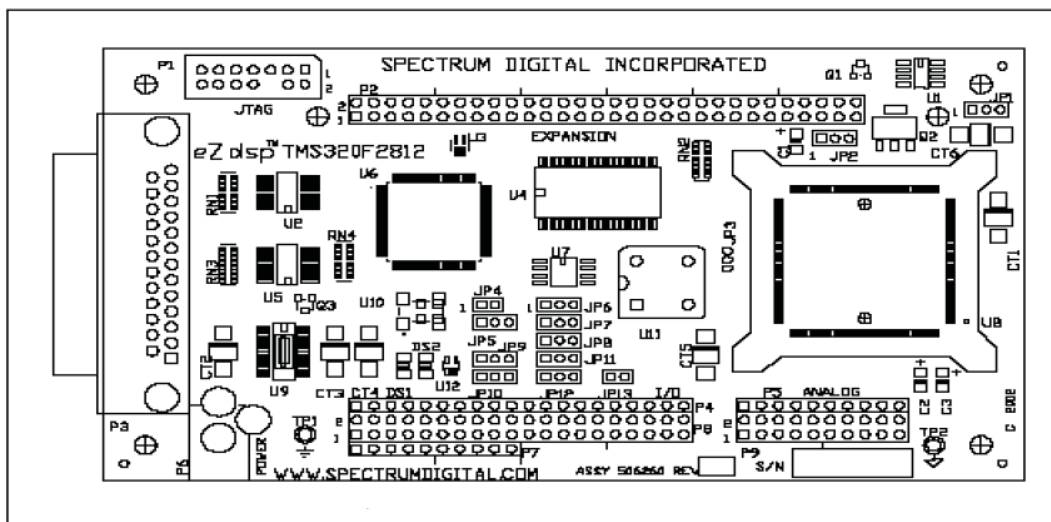
ตารางที่ 2.2 สรุปช่วงเวลาของการสวิตช์ในทุก Section

Sector	Upper Switches (S_1, S_3, S_5)	Lower Switches (S_4, S_6, S_2)
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
2	$S_1 = T_1 + T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
3	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_0 / 2$
4	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
5	$S_1 = T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$



รูปที่ 2-24 แสดงไดอะแกรมของการสวิตช์ในแต่ละ Section

2.10.5 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของ TMS320F2812²⁰



รูปที่ 2-25 รูปร่างของบอร์ด eZdsp TMS 320F2812

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ผลิตภัณฑ์ของบริษัทเทคซัสอินสตรูเมนต์ (Texas Instrument) ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Controller) ที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยเฉพาะเนื่องจากโครงสร้างภายในมีความอ่อนตัวเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายชนิด เช่นมอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และรีแอคเตอร์มอเตอร์ เป็นต้น มีลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. สร้างโดยใช้เทคโนโลยี High-Performance Static CMOS มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 150 MHz หรือ 6.67 ns ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
2. รองรับกับพอร์ต JTAG Boundary Scan
3. หน่วยประมวลผลกลางประสิทธิภาพสูงขนาด 32 บิตใช้สถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard Bus Architecture) ปฏิบัติการแบบ 16x16 และ 32x32 มีกระบวนการตอบสนองอินเทอร์รัพท์ที่รวดเร็ว

²⁰ Texas Instrument. "Ezdsp f2812 Technical Reference." Rev. F, Sept. 2003

4. คอมแพคตดิเบิ้ลกับชุดคำสั่งของ DSP ตระกูล TMS320F24x/LE240x หน่วยความจำ ชนิด SARAM หรือ Flash ขนาด 128K x16 บิต
5. มี Boot Rom ขนาด 4K x 16 ภายในบรรจุ Software Boot Modes และตาราง คณิตศาสตร์
6. ตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลความละเอียด 12 บิตจำนวน 16 ช่องสัญญาณ อินพุตมีลักษณะเป็นแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ชุดๆละ 8 ช่องสัญญาณ มีตัวสุ่มและคงค่า (Sample-and-Hold) จำนวนสองชุด สามารถทำการแปลงสัญญาณเพียงช่องเดียวหรือ ทุกช่องพร้อมกันได้ ซึ่งใช้เวลาในการแปลงสัญญาณเพียง 80 ms ต่อ 1 ครั้ง
7. ตัวสร้างสัญญาณ PWM(Pulse Width Modulation) 12 ช่องสัญญาณ เรียกว่า Event Manager จำนวน 2 ชุด EVA, EVB
8. ตัวขับขนาด 32 บิต 3 ชุด
9. ตัวรับสัญญาณจากเอ็นโคดเดอร์ (Quadrature Encoder Pulse)
10. Enhance Controller Area Network (eCAN) Module
11. Multichannel Buffered Serial Port (McBSP) with SPI Mode
12. อินพุต/เอาต์พุต พอร์ต 56 ช่อง
13. ชุดติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม
14. รองรับสัญญาณอินเตอร์รัพท์จากอุปกรณ์รอบข้างจำนวน 45 แหล่ง
15. สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

TMS320F2812 แบ่งออกเป็นสามส่วนใหญ่ๆ ได้ดังนี้ คือ

1. หน่วยประมวลผลกลาง (Control Processing Unit: CPU)
2. หน่วยความจำ (Memory)
3. อุปกรณ์รอบข้าง (Peripherals)

หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลกลาง เป็นหน่วยประมวลชนิดจุดทศนิยมคงที่ (Fixed Point) โดยมีขนาด 32 บิต อุปกรณ์นี้อาศัยข้อดีของกระบวนการประมวลสัญญาณดิจิตอล ด้วยการใช้สถาปัตยกรรมแบบ RISC ร่วมกับสถาปัตยกรรมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อดีของ DSP รวมถึงสถาปัตยกรรมแบบฮาร์ดวาค (Harward) และการอ้างอิงตำแหน่งแบบวงกลม ข้อดีในส่วนของ RISC คือ ซีพียูสามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถกระทำคำสั่งได้ภายในหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา โดยผ่านทางไปไลน์ (Pipeline) และการกระทำแบบรีจิสเตอร์ ไปยังรีจิสเตอร์ ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์ ก็

คือ ความง่ายของการใช้งานผ่านทางชุดคำสั่ง และสามารถใช้งานในระดับบิตได้ ส่วนประกอบของหน่วยประมวลผลกลางมีดังนี้คือ

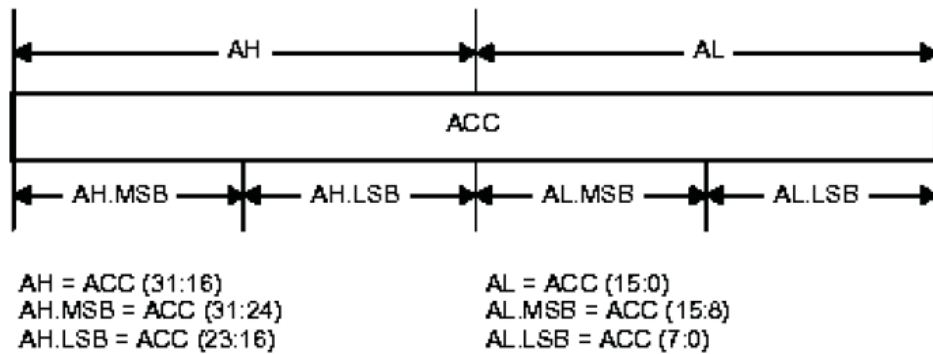
1. หน่วยประมวลผลกลาง สำหรับถอดรหัสกระทำคำสั่งคำนวณทางคณิตศาสตร์ ลอจิกการเลื่อนบิต และควบคุมการส่งผ่านข้อมูลระหว่างรีจิสเตอร์ หน่วยความจำข้อมูล และหน่วยความจำโปรแกรม
2. อีมูเลชันลอจิก (Emulation Logic) สำหรับแสดงผลและควบคุมในหลายๆส่วนและสำหรับตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์
3. สัญญาณสำหรับการเชื่อมต่อกับหน่วยความจำ และอุปกรณ์ภายนอก สัญญาณนาฬิกา และควบคุมหน่วยประมวลผลกลาง สัญญาณอีมูเลชันลอจิก แสดงผลสถานะภาพของหน่วยประมวลผลกลางอีมูเลชันลอจิก และการอินเตอร์รัพท์

สถาปัตยกรรมของหน่วยประมวลผลกลาง

1. ลอจิกควบคุมการทำงานโปรแกรม และข้อมูลลอจิกนี้ทำหน้าที่เก็บแถวของคำสั่งที่มีอยู่ โดยไปเอามาจากหน่วยความจำโปรแกรม
2. หน่วยตำแหน่งของรีจิสเตอร์ที่มีการกระทำทางคณิตศาสตร์ (Address Register Arithmetic Unit : ARAU) ARAU ให้กำเนิดตำแหน่งสำหรับค่าที่ต้องไปเอามาจากหน่วยความจำข้อมูล สำหรับการอ่านข้อมูล สถานที่ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่งบนบัสตำแหน่งอ่านข้อมูล (Data-read Address Bus :DRAB) สำหรับการเขียนข้อมูลที่ถูกบรรจุอยู่ที่บัสตำแหน่งเขียนข้อมูล (Data-write Address Bus :DWAB) ARAU สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสแต็กพอยเตอร์ (Stack Pointer) และ รีจิสเตอร์ช่วย (Auxiliary Register) (XAR0, XAR1, XAR2, XAR3, XAR4, XAR5, XAR6, XAR7)
3. หน่วย (atomic arithmetic logic unit (ALU) มีขนาด 32 บิต มีการกระทำทางคณิตศาสตร์แบบ 2' Complement และ การกระทำลอจิกบูลีน (Boolean Logic) ซึ่งก่อนที่ ALU จะกระทำการคำนวณนั้น ALU จะตอบรับข้อมูลจากรีจิสเตอร์ หน่วยความจำข้อมูล หรือจากโปรแกรมควบคุมลอจิก จากนั้น ALU จะเก็บผลลัพธ์ไปยังรีจิสเตอร์หรือหน่วยความจำข้อมูล
4. จุดทศนิยมคงที่ (Fixed-point : MPY/ALU) ตัวคูณกระทำการคูณแบบ 32 บิต x 32 บิต ชนิด 2' Complement พร้อมกับผลลัพธ์ขนาด 64 บิต โดยกระทำร่วมกับรีจิสเตอร์ XT รีจิสเตอร์ผลลัพธ์ P และแอสคีมูเลเตอร์ขนาด 32 บิต ผลลัพธ์ของการคูณสามารถส่งไปยังรีจิสเตอร์ P ได้

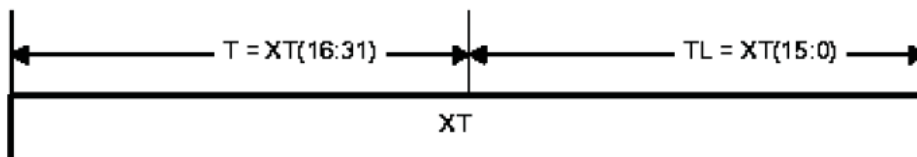
รีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง

1. แอคคิวมูเลเตอร์ (ACC, AH, AL) คือรีจิสเตอร์หลักที่ทำงานสำหรับกระบวนการทำงานทั้งหมดของ ALU นอกเหนือจากการกระทำโดยตรงบนหน่วยความจำ แอคคิวมูเลเตอร์รองรับการเคลื่อนย้ายแบบรอบเดียว รวมถึง การบวก การลบ และกระบวนการเปรียบเทียบจากหน่วยความจำข้อมูลขนาด 32 บิต ซึ่งเป็นความสามารถที่นอกเหนือจากผลลัพธ์ 32 บิต ของการกระทำการคูณแอกคิวมูเลเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นรีจิสเตอร์อิสระขนาด 16 บิต ได้ 2 ตัว คือ AH (16 บิตทางด้านสูง) และ AL (16 บิตทางด้านต่ำ) ซึ่งแต่ละไบต์ภายใน AH และ AL สามารถเข้าถึงได้อย่างอิสระดังแสดงในรูปที่ 2-26



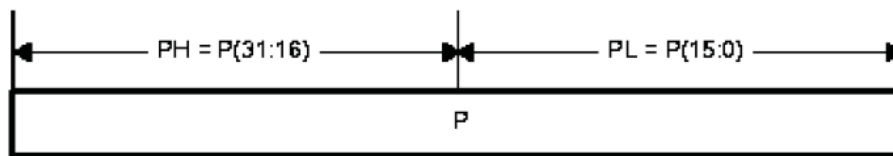
รูปที่ 2-26 ส่วนของแอกคิวมูเลเตอร์ที่เข้าถึงได้

2. รีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตั้งสำหรับคูณ (Multiplication Register : XT) รีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตั้งสำหรับคูณ ถูกใช้สำหรับเก็บค่าจำนวนเต็มที่มีเครื่องหมายขนาด 32 บิต เพื่อที่จะส่งไปกระทำการคูณต่อไป ส่วน 16 บิตทางต่ำของรีจิสเตอร์ XT เรียกว่ารีจิสเตอร์ TL และ 16 บิตทางด้านสูงของรีจิสเตอร์ XT เรียกว่ารีจิสเตอร์ T รีจิสเตอร์นี้ส่วนใหญ่ใช้เก็บค่าจำนวนเต็มขนาด 16 บิต ที่เกิดจากการคูณ และใช้ระบุค่าการเลื่อนบิตสำหรับบางการทำงานของกระบวนการเลื่อนบิต



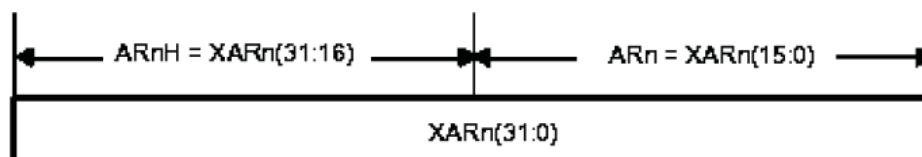
รูปที่ 2-27 ส่วนของรีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตั้งสำหรับคูณที่สามารถเข้าถึงได้

- รีจิสเตอร์ผลลัพธ์ (Product Register : P, PH, PL) รีจิสเตอร์ผลลัพธ์โดยปกติถูกใช้สำหรับเก็บผลลัพธ์ขนาด 32 บิต ที่เกิดจากการคูณและสามารถเคลื่อนย้ายข้อมูลขนาด 16 บิตหรือ 32 บิตได้โดยตรงจากหน่วยความจำข้อมูล ค่าคงที่ขนาด 16 บิตค่า 32 บิต จากแอสเซมบลีเตอร์ และ 16 บิตหรือ 32 บิต จากการอ้างตำแหน่งของรีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง รีจิสเตอร์นี้แบ่งออกได้เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต สองส่วนคือ รีจิสเตอร์ PH (16 บิตทางด้านสูง) และรีจิสเตอร์ PL (16 บิตทางด้านล่าง)



รูปที่ 2-28 ส่วนของรีจิสเตอร์ผลลัพธ์ที่สามารถเข้าถึงได้

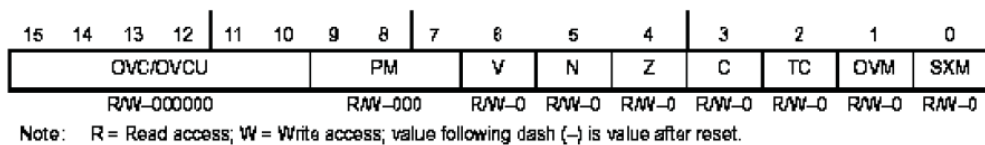
- ตัวชี้บนหน่วยความจำ (Data Page Pointer : DP) ในโหมดการอ้างตำแหน่งโดยตรง หน่วยความจำข้อมูลจะถูกระบุตำแหน่งโดยแบ่งออกเป็นออกเป็นตอนละ 64 เวิร์ด ซึ่งถูกเรียกว่าหน้าหน่วยความจำ
- ตัวชี้สแตค (Stack Pointer : SP) ตัวชี้สแตคทำให้สามารถใช้ซอฟต์แวร์สแตคในหน่วยความจำข้อมูลได้ ตัวชี้สแตคมีขนาด 16 บิต และสามารถอ้างตำแหน่งได้เฉพาะ 64K ของพื้นที่ข้อมูล
- รีจิสเตอร์ช่วย (Auxiliary Register: XAR0-XAR7, AR0-AR7) หน่วยประมวลผลกลางจะเปิดช่องให้รีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต จำนวน 8 ตัวให้สามารถใช้ตัวชี้ไปยังหน่วยความจำหรือรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไป รีจิสเตอร์ช่วยนี้ใช้สำหรับเมื่อต้องการอ้างถึงตำแหน่งในหน่วยความจำแบบต่างๆ และเช่นเดียวกันรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต ทั้ง 8 ตัวนี้แต่ละตัวสามารถแบ่งเป็นสองส่วนๆ ละ 16 บิต ดังแสดงในรูปที่ 2-29



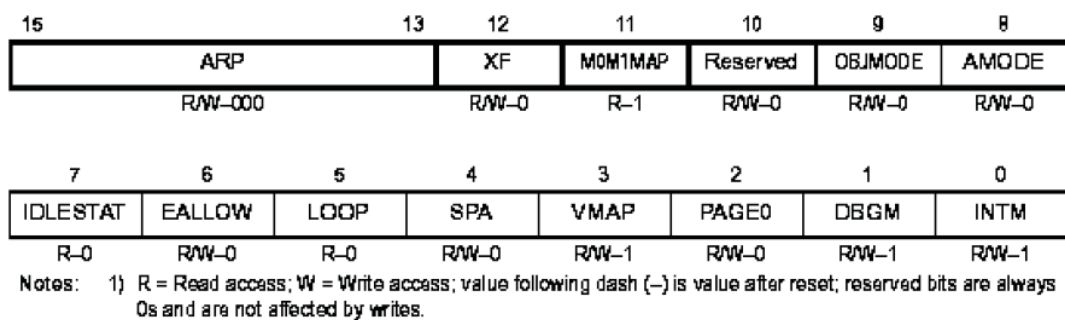
รูปที่ 2-29 รีจิสเตอร์ XAR0-XAR7

n คือ จำนวนตั้งแต่ 0 ไปถึง 7

7. โปรแกรมเคาน์เตอร์ (Program Counter : PC) หน้าที่หลักของโปรแกรมเคาน์เตอร์คือเป็นตัวชี้ตำแหน่งของคำสั่งต่อไปที่จะทำการ fetch
8. รีเทิร์นโปรแกรมเคาน์เตอร์ (Return Program Counter : RPC) เมื่อทำการเรียกใช้คำสั่ง LCR ตำแหน่งที่ใช้ในการย้อนกลับถูกเก็บในรีจิสเตอร์ RPC ค่าเดิมในรีจิสเตอร์ RPC ถูกเก็บบนสแตค กระบวนการย้อนกลับสามารถทำได้โดยการใช้คำสั่ง LRETR โดยตำแหน่งที่ทำการย้อนกลับจะอ่านจากรีจิสเตอร์ RPC และค่าบนสแตคจะถูกเขียนไปยังรีจิสเตอร์ RPC
9. รีจิสเตอร์สถานะ (Status Register :ST0,ST1) บน TMS320F2812 มีรีจิสเตอร์สถานะอยู่สองตัวคือ ST0 และ ST1 ซึ่งบรรจุบิตแฟลกและบิตควบคุมอยู่ภายใน รีจิสเตอร์นี้สามารถที่จะถูกเก็บและถูกโหลดได้จากหน่วยความจำข้อมูล



รูปที่ 2-30 รีจิสเตอร์สถานะ ST0



รูปที่ 2-31 รีจิสเตอร์สถานะ ST1

10. รีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมกระบวนการอินเทอร์รัพท์ TMS320F2812 มีรีจิสเตอร์ อยู่สามตัวที่ใช้ควบคุมกระบวนการอินเทอร์รัพท์ คือ
 1. อินเทอร์รัพท์แฟลกรีจิสเตอร์ (Interrupt Flag Register: IFR)
 2. อินเทอร์รัพท์เอเนบิลรีจิสเตอร์ (Interrupt Enable Register: IER)
 3. ดีบั๊กอินเทอร์รัพท์เอเนบิลรีจิสเตอร์ (Debug Interrupt Enable Register: DBGIER)

ภายใน IFR บรรจุบิตแฟล็กสำหรับกระบวนการมา สเคเบิลอินเทอร์รัพท์ (Master Interrupt) เมื่อบิตใดบิตหนึ่งของแฟล็กถูกเซต ไม่ว่าจะโดยฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ กระบวนการอินเทอร์รัพท์ จะได้รับการตอบสนองถ้าได้มีการเปิดการทำงานเอาไว้ ซึ่งสามารถเปิดหรือปิด กระบวนการทำงานมาสเคเบิลอินเทอร์รัพท์ได้ที่บิตใน IER

การจัดผังหน่วยความจำ

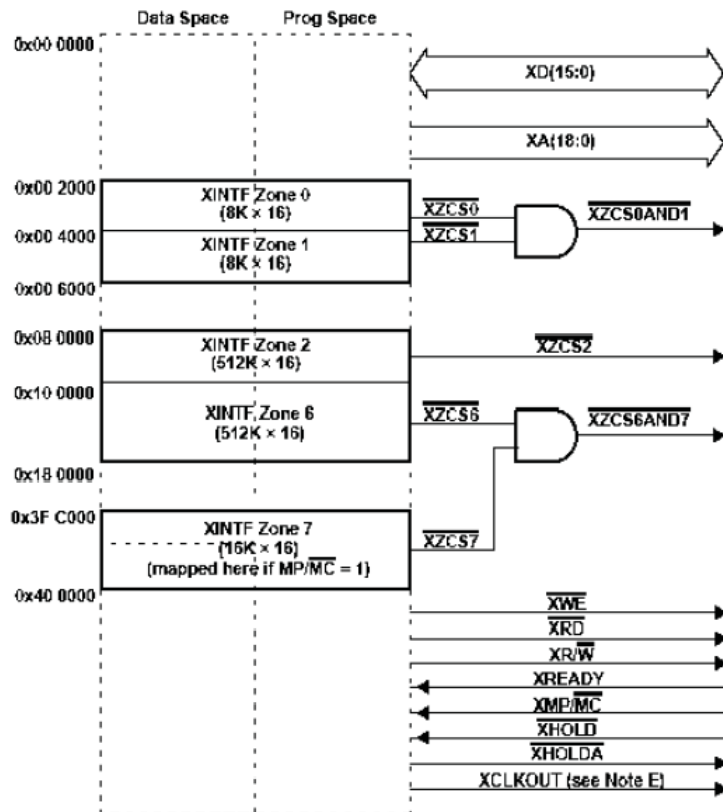
TMS320F2812 มีการอ้างที่อยู่แยกกันระหว่างหน่วยความจำข้อมูลกับ หน่วยความจำโปรแกรม อีกทั้งยังสามารถติดต่อกับหน่วยความจำที่อยู่ภายนอกได้ ตำแหน่งของข้อมูลใช้ขนาด 32 บิต และตำแหน่งของโปรแกรมใช้ขนาด 22 บิต โดยผังของหน่วยความจำมีการแบ่งออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

1. หน่วยความจำข้อมูลและหน่วยความจำโปรแกรมภายใน
2. พื้นที่สงวน
3. เวกเตอร์สำหรับการอินเทอร์รัพท์ของ CPU

ในช่วงตำแหน่ง “Low 64K” ของผังหน่วยความจำจะเปรียบเสมือนกับพื้นที่ของข้อมูลบน DSP ตระกูล 240x ส่วน “High 64K” ในช่วงตำแหน่งของผังหน่วยความจำจะเปรียบเสมือน กับพื้นที่ของโปรแกรมบน DSP ตระกูล TMS320F24x/240x ซึ่งการที่จะให้มีความคอมแพตติเบิลกับโค้ดของตระกูล TMS320F24x/240x นั้นต้องกระทำเฉพาะจากพื้นที่ของหน่วยความจำบริเวณ “High 64K” ดังนั้น บล็อกส่วนบนขนาด 32K ของหน่วยความจำแฟลชและ H0 SARAM (Single- Access RAM) สามารถใช้โค้ดของตระกูล 24x/240x ที่คอมแพตติเบิลกันทำงานได้ และ นอกจากนั้นโค้ดสามารถที่จะทำงานได้จากหน่วยความจำภายนอกผ่านทาง XINTF Zone 7

การเชื่อมต่อกับภายนอก (XINTF)

การเชื่อมต่อกับภายนอกของ TMS320F2812 ได้ถูกกำหนดไว้จำนวน 5 โชนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-32 ซึ่งกระบวนการทำงานและคาบเวลา (Timing) สามารถควบคุมได้โดยใช้รีจิสเตอร์ในส่วนของการเชื่อมต่อกับภายนอก



รูปที่ 2-32 บล็อกไดอะแกรมของการเชื่อมต่อกับภายนอก

ในแต่ละส่วนของ XINTF จะมีสัญญาณเลือก (Chip-select) เพื่อให้สามารถใช้งานได้เฉพาะโซนและในบางโซนมีการใช้งานสัญญาณเลือกร่วมกันโดยผ่านกระบวนการ AND

อุปกรณ์รอบข้าง

อุปกรณ์รอบข้างของ TMS320F2812 ประกอบด้วย

1. TIMER ขนาด 32 บิต (0,1,2) บน TMS320F2812 มี Timer ของหน่วยประมวลผลกลาง ขนาด 32 บิตจำนวน 3 ตัวคือ Time 0/1/2 Timer 1 และ 2 ถูกสงวนไว้สำหรับระบบการทำงาน of หน่วยประมวลผลกลาง ส่วน Timer 0 นั้นเป็นส่วนที่ผู้ใช้สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่ง Timer นี้ได้ถูกใช้งานในโมดูล Event manager ทั้ง EVA และ EVB ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกที่แตกต่างออกไป คือ “Timer สำหรับใช้งานทั่วไป (general-purpose (GP) timer)”
2. โมดูล Event Manager (EVA, EVB) Event Manager ได้รวม TIMER สำหรับใช้งานทั่วไป (GPTimers) หน่วย Full-compare PWM หน่วย Capture และ วงจร Quadrature-encode Pulse (QEP) ในรูปที่ 2-32 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Event Manager A ส่วนบล็อกไดอะแกรม Event Manager B นั้น จะเหมือนกันกับ Event Manager A แต่ก็มีส่วน

ที่แตกต่างกัน คือชื่อของสัญญาณและตำแหน่งที่อยู่ของรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานซึ่งได้แสดงรายละเอียดชื่อของสัญญาณไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชื่อสัญญาณของ Event Manager A และ Event Manager B

Event Manager Modules	EVA		EVB	
	Module	Signal	Module	Signal
GP Timers	GP Timer 1	T1PWM/T1CMP	GP Timer 3	T3PWM/T3CMP
	GP Timer 2	T2PWM/T2CMP	GP Timer 4	T4PWM/T4CMP
Compare Units	Compare 1	PWM1/2	Compare 4	PWM7/8
	Compare 2	PWM3/4	Compare 5	PWM9/10
	Compare 3	PWM5/6	Compare 6	PWM11/12
Capture Units	Capture 1	CAP1	Capture 4	CAP4
	Capture 2	CAP2	Capture 5	CAP5
	Capture 3	CAP3	Capture 6	CAP6
QEP Channels	QEP1	QEP1	QEP3	QEP3
	QEP2	QEP2	QEP4	QEP4
	QEP11	CAP3	QEP12	CAP6
External Clock Inputs	Direction	TDIRA	Direction	TDIRB
	External Clock	TCLKINA	External Clock	TCLKINB
External Compare Inputs	Compare	C1TRIP		C4TRIP
		C2TRIP		C5TRIP
		C3TRIP		C6TRIP
External Trip Inputs		T1CTRIP/ PDPINTA1		T3CTRIP/ PDPINTB1
		T2CTRIP/ EVASOC		T4CTRIP/ EVBSOC

Timer สำหรับใช้งานทั่วไป (GP timer) Timer สำหรับใช้งานทั่วไป สามารถทำงานได้อย่างอิสระหรือทำงานพร้อมกันในแต่ละ Timer รีจิสเตอร์สำหรับใช้เปรียบเทียบ (Compare Register) เป็นส่วนเดียวกันกับ Timer ซึ่งเมื่อทำงานร่วมกันแล้วจะสามารถสร้างสัญญาณ PWM ออกมาได้

หน่วย Full-compare ใน Event Manager แต่ละชุดมีหน่วย Full-compare อยู่ชุดละ 3 ตัว หน่วย Full-compare นี้ใช้ GP timer 1 เป็นตัวสร้างฐานเวลาในการให้กำเนิดสัญญาณ PWM ทั้ง 6 เาต์พุต ในแต่ละส่วนของทั้ง 6 เาต์พุต สามารถปรับแต่งให้เป็นอิสระต่อกัน

วิธีกำหนด Deadband การให้กำเนิด Deadband นั้นสามารถเปิดปิดการทำงานของแต่ละเอาต์พุตได้ในหน่วย Compare ซึ่งวงจรให้กำเนิด Deadband สร้างเอาต์พุตมาสองค่าคือ โชนที่มี Deadband กับโชนที่ไม่มี Deadband

หน่วย Capture หน่วย Capture ได้มีการจัดเตรียมฟังก์ชันสำหรับเหตุการณ์ที่ผิดกันหรือเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าของ GP Timer Counter ที่ถูกเลือกให้ตรวจจับจะเก็บไว้ใน สแตกที่มีชื่อว่า Two-level-deep FIFO

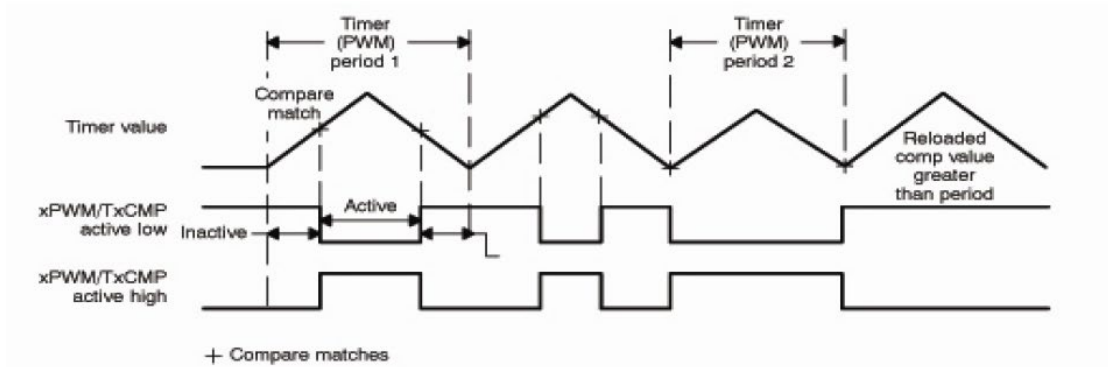
วงจร Quadrature-Encoder Pulse (QEP) อินพุตทั้งสองของ Capture (CAP1 และ CAP2) สำหรับ EVA; CAP4 CAP5 สำหรับ EVB) สามารถใช้เชื่อมต่อกับวงจร Quadrature-encoder Pulse (QEP) จะตรวจสอบทิศทางหรือลำดับของ Leading-quadrature Pulse และ GP timer 2/4 จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้น อยู่กับขอบขาขึ้น และขอบขาลงของสัญญาณอินพุตทั้งสอง

3. โมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
 - มีความละเอียด 12 บิต และมีวงจร Sample and Hold (S/H) บรรจุอยู่ใน
 - สัญญาณอนาล็อกของอินพุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 โวลต์
 - ใช้ระยะเวลาในการแปลง 80ns เมื่อความถี่อินพุตของ ADC คือ 25MHz
 - มีอินพุตแบบมัลติเพล็กซ์จำนวน 16 ตัว
 - มีรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการเก็บผลลัพธ์ในการแปลงจำนวน 16 ตัว
 - มีความยืดหยุ่นในการควบคุมกระบวนการอินเทอร์รัพท์โดยยอมรับให้เกิดการร้องขออินเทอร์รัพท์บนทุกๆ End-of-sequence (EOS)
 - สามารถทำการแปลงในโหมดเรียงตามลำดับทั้งหมดโดยอัตโนมัติ (Autosequenced ADC in Cascade Mode) ซึ่งสามารถใช้งานอินพุตได้ทั้ง 16 ช่อง หรือขึ้นอยู่กับว่าต้องการเลือกให้อินพุตช่องใดทำงาน
 - สามารถทำการแปลงในโหมดเรียงตามลำดับทั้งหมดโดยอัตโนมัติแบบเรียงตามลำดับคู่ (Autosequenced ADC With Dual Sequencers) โดยแบ่งอินพุตออกเป็นสองส่วนๆ ละ 8 ช่อง ซึ่งทั้งสองส่วนนี้สามารถสั่งให้เริ่มทำงานได้โดยเป็นอิสระต่อกัน
4. Watchdog F2810 และ F2812 สนับสนุนการทำงานของ Watchdog Timer โดยผู้ใช้ต้องเขียนโปรแกรมเพื่อทำการรีเซ็ต Watchdog counter นอกจากนี้ยังเกิดการรีเซ็ต Watchdog ได้จากกระบวนการทำงาน ซึ่งสามารถหยุดการทำงานของ Watchdog ได้โดยการ disable
5. General-purpose Input/Output (GPIO) Multiplexer เป็นอินพุต/เอาต์พุตของสัญญาณที่ถูกใช้โดยการมัลติเพล็กซ์ในขณะที่รีเซ็ต ขา GPIO ทั้งหมดจะถูกจัดให้เป็นอินพุต นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดให้ขาอินพุต/เอาต์พุต เป็นได้ทั้งหมด GPIO และโหมดอินพุต/เอาต์พุต ทั่วไป
6. Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block PIE block สามารถรองรับการอินเทอร์รัพท์ได้จาก 96 แหล่ง โดยสามารถแบ่งได้ 8 กลุ่ม แต่ละกลุ่มถูกป้อนยังอินพุต การอินเทอร์รัพท์ 12 เส้น (INT1 ถึง INT12) ซึ่งอินเทอร์รัพท์ทั้ง 96 จะมีตำแหน่งเวกเตอร์ของตัวเองในบล็อกหน่วยความจำแบบ RAM ซึ่งสามารถเขียนซ้ำได้

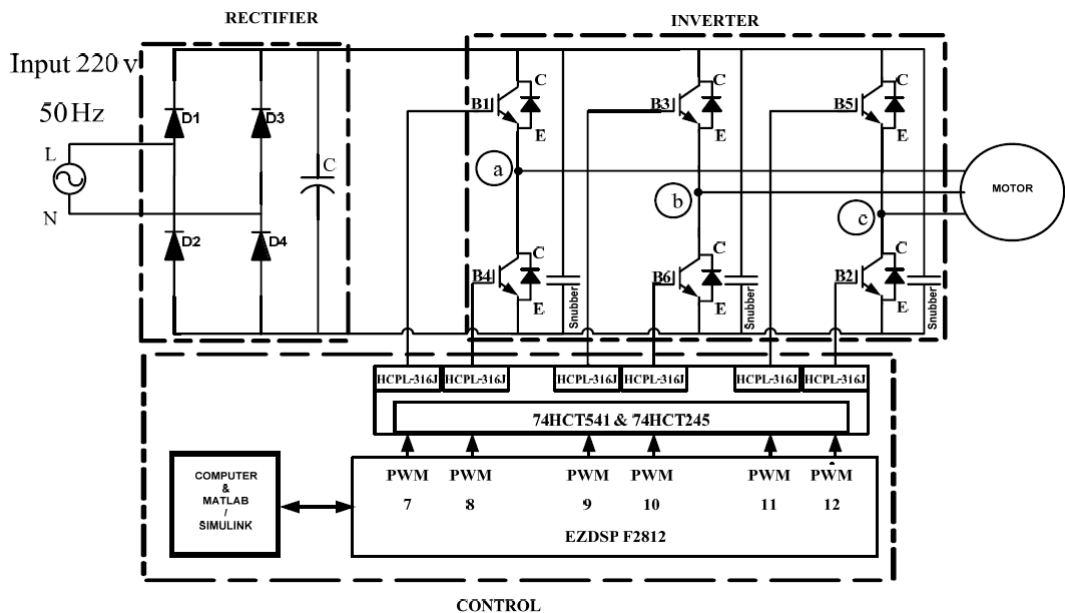
7. Enhanced Controller Area Network (Ecan) ในเวอร์ชันนี้ประกอบด้วย CAN ซึ่งสนับสนุนแมล์บ็อกซ์ และบันทึกเวลาของแต่ละแมสเสจที่เข้ามา ซึ่งเป็น CAN 12.0 B
8. Multichannel Buffered Serial Port (McBSP) McBSP สามารถใช้ต่อการเข้ารหัสของโมเด็มได้ หรือใช้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอกแบบสเตอริโอคุณภาพสูงได้ ซึ่ง McBSP จะรับส่งข้อมูลในรีจิสเตอร์แบบ FIFO (First In First Out)
9. Serial Port Interface (SP1) SP1 เป็นพอร์ตอินพุต เอาต์พุตอนุกรมแบบซิงโครนัส (Synchronous) ความเร็วสูง ซึ่งสามารถส่งข้อมูลโดยมีจำนวนบิตได้ตั้งแต่ 1 ถึง 16 บิต ซึ่งสามารถเข้าและออกอุปกรณ์โดยอัตราการส่งสามารถโปรแกรมได้โดยปกติ SP1 ใช้สำหรับการติดต่อกันระหว่าง DSP คอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ภายนอกหรือโปรเซสเซอร์อื่นๆ ซึ่งโดยปกติจะรวมไปถึงการใช้งาน I/O ภายนอกหรือการส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ เช่น ชิพรีจิสเตอร์ (Shift Register) ไดรเวอร์การแสดงผลและ ADC ในการติดต่อกัน ระหว่างอุปกรณ์หลายๆ ตัว จะใช้ระบบมาสเตอร์/สลาฟ (Master/Slave) ของ SPI และ F2812 จะสามารถส่งข้อมูลแบบ FIFO 16 ระดับ ซึ่งช่วยทำให้การทำงานต่างๆ รวดเร็วยิ่งขึ้น
10. Serial Communication Interface (SCI) SCI เป็นพอร์ตอนุกรมแบบ 2 เส้น (Two-wire) ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อของ UART ซึ่งใน F2810 และ F2812 สนับสนุนการรับ-ส่งข้อมูลแบบ FIFO

บล็อก C28x PWM

เป็นส่วนของการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็ม 12 สัญญาณ โดยนำคาบเวลาที่ได้จากโปรแกรมในส่วนของการคำนวณคาบเวลา มากำหนดเวลาในการสับสวิทช์ของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแต่ละตัว โดยจะนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มทั้ง 12 สัญญาณ เมื่อพิจารณาภายในโครงสร้าง Event Manager ของ DSP จะเห็นว่ามีส่วนที่ช่วยในการสร้างสัญญาณ PWM แบบสมมาตรที่เรียกว่า Symmetric Waveform Generation โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบกับตัวนับภายใน ถ้าค่าตัวนับมีค่ามากกว่าตัวเปรียบเทียบจะทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนสถานะไป ดังรูปที่ 2-33



รูปที่ 2-33 การสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็ม

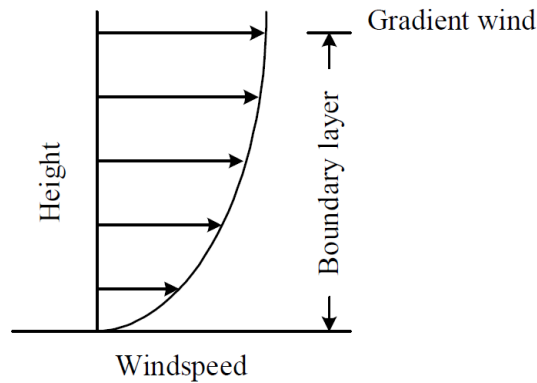


รูปที่ 2-34 วงจรของอินเวอร์เตอร์

2.11 ทฤษฎีของกังหันลม

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้น หมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศและมีแรงฝัดอันเกิดจากการปะทะกับสิ่งกีดขวางร่วมกระทำด้วยในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงต้านจะลดลงและ ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2-35 ส่วนที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบไม่มีแรงฝัดความเร็วลมเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระดับความสูงและ สภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกับกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่ากังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่ นั่น ก็ขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆกันแต่มีทิศทางลมที่แตกต่างกัน เมื่อพุง

เข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลมเป็นอย่างมาก ผลคือแรงลัพธ์ที่ได้
ออกมาจากกังหันลมแตกต่างกัน



รูปที่ 2-35 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ (atmosphere boundary layer)

ที่มา : นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์. 2547: 66)

พลังงานลม (E_{Wind}) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศ
ที่มีมวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์

$$E_w = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2-118)$$

เมื่อ E_w = พลังงานจลน์ (J)
 m = มวลของวัตถุ (kg)
 v = ความเร็วลม (m/s)

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาดังนี้

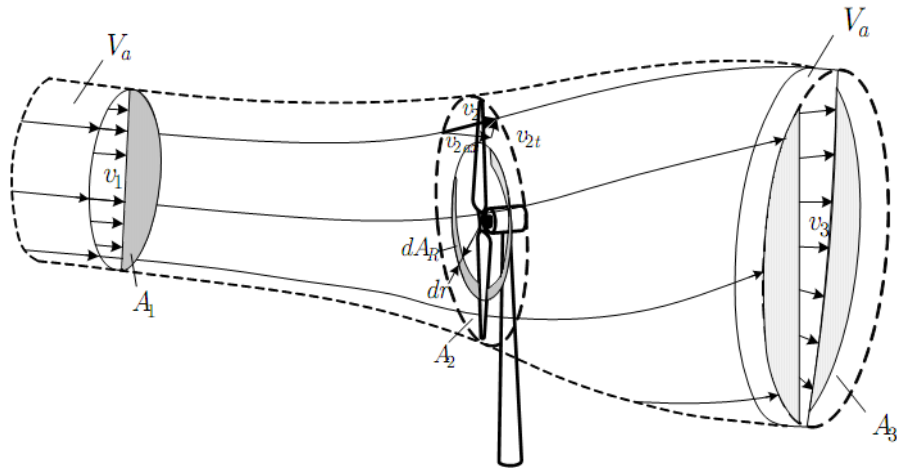
$$\dot{m} = \rho Av \quad (2-119)$$

เมื่อ \dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 ρ = ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.225 kg/m^3
 A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

แทนสมการ (2-119) ใน (2-118) จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งก็คือสมการของกำลัง
งานลม (P_{Wind}) นั่นเอง

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2-120)$$

เมื่อ P_w คือ พลังงานลม (W)



รูปที่ 2-36 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

ที่มา : การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกังหันลมฯ, กรวิทย์, 2549

จากรูปที่ 2-36 พลังงานลมที่สกัดได้จากปริมาตรของอากาศ V_a ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 และมีความเร็วลม v_1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่หน้าตัด A_3 ถูกขยายขึ้นเมื่อ V_a เคลื่อนที่ผ่านกังหัน สามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2-121)$$

จะได้สมการของพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดต่อหน่วยเวลา

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = d \frac{V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2)}{dt} \quad (2-122)$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม ($A_2 = A_{turb}$)

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{turb} v_2 \quad (2-123)$$

ฉะนั้นจะได้

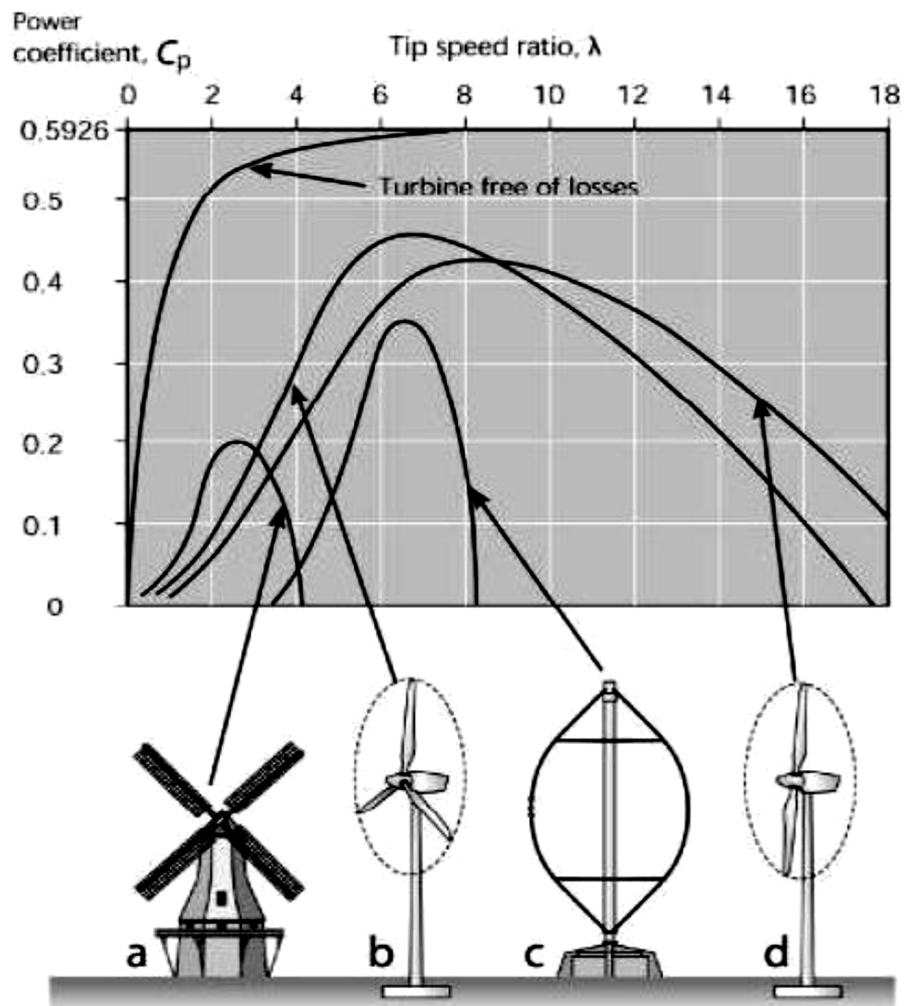
$$P_w = A_{turb} \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad (2-124)$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม A_{turb} , ความเร็วลม และลักษณะใบของกังหันลม Albert Betz เป็นผู้เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด $C_{p_{max}}$ (Turner, 2004) ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าสูงสุดทางทฤษฎีของการสกัดกำลังงานจากกระแสลมให้ได้สูงสุด เรียกว่า Betz Coefficient โดยได้ค่า $C_{p_{max}}$ เท่ากับ $16/27$ หรือประมาณ 0.5926

$$P_w^{max} = \frac{16}{27} A_{turb} \frac{\rho}{2} v_1^3 \quad (2-125)$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

$$v_2 = \frac{2}{3} v_1 \quad \text{and} \quad v_3 = \frac{1}{3} v_1 \quad (2-126)$$



รูปที่ 2-37 สัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient, C_p) และอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (Tip Speed Ratio) ของกังหันลมแบบต่างๆ

ที่มา : การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมขนาดเล็ก, ธนพล, 2552

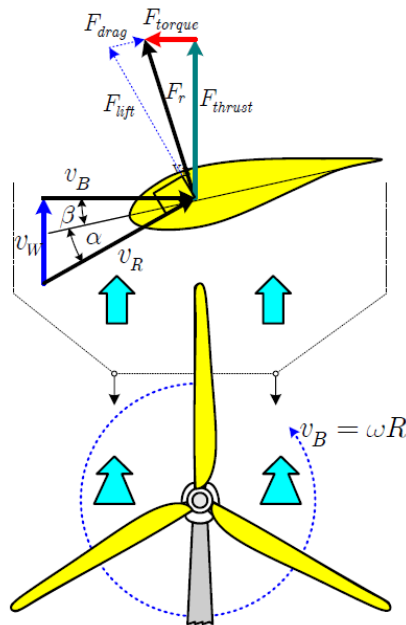
C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยที่กราฟคุณลักษณะ C_p เป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบ

$$C_p = \frac{P_w}{P_{Wind}} \quad (2-127)$$

จากสมการที่ (2-125) ซึ่งจะได้กำลังงานของลมที่ผ่านกังหัน แต่กำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ด้วย เพราะฉะนั้นสมมติให้กังหันลมมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_a) จะเป็นดังนี้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p \quad (2-128)$$

2.10.1 กระบวนการเกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์



รูปที่ 2-38 กระบวนการเกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์

ที่มา : การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกังหันลมฯ, กรวิทย์, 2549

รูปที่ 2-38 แสดงกังหันลม 3 ใบพัด ที่มีความเร็วลม v_w กระทำต่อใบพัดจากด้านหน้า และแสดงภาคตัดของใบพัดเมื่อมองจากด้านบน (Top View) พิจารณาภาคตัดของใบพัด v_w คือเวกเตอร์

ของความเร็วมวลที่กระทำต่อใบพัดจากด้านหน้าและก้านค้ำกลางหมุนทวนเข็มนาฬิกา จะทำให้ใบพัดเสมือนได้รับความเร็วมวลอีกตัวหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน ซึ่งก็คือเวกเตอร์ v_B ดังแสดงในภาพนั่นเอง เรียกเวกเตอร์นี้ว่า ความเร็วมวลเพิ่มเติม (Additional Wind Speed) ผลบวกของ v_w และ v_B ทำให้เกิดเวกเตอร์ความเร็วมวลลัพธ์ (Resulting Wind Speed) v_R เวกเตอร์ v_R ที่กระทำต่อใบพัดจะทำให้เกิดแรงขึ้น 2 แรง คือ แรงแยก (Lifting Force lift F_{lift}) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางตั้งฉากกับ v_R และแรงฉุด (Drag Force drag F_{drag}) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับ v_R โดยขนาดของเวกเตอร์ทั้งสอง ขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบพัดและขนาดของ v_R

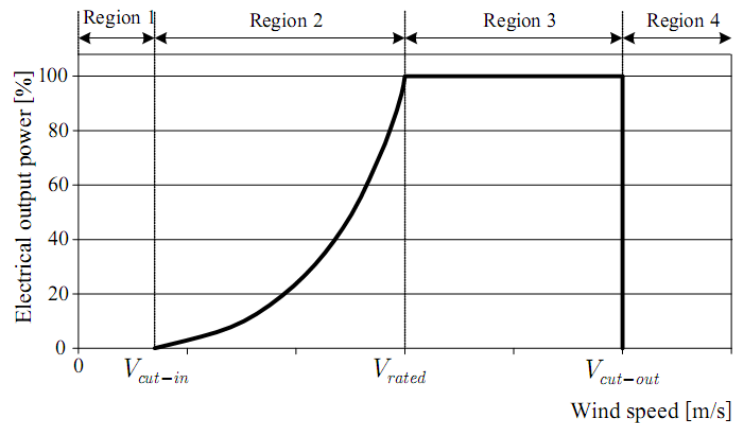
ผลบวกของ F_{lift} และ F_{drag} ทำให้เกิดเวกเตอร์ที่เรียกว่า แรงแอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Force, F_r) ซึ่งส่วนหนึ่งของแรงนี้จะทำให้เกิดแรงผลัก (Thrust Force thrust, F_{thrust}) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับความเร็วมวล มีผลโดยตรงต่อเสาของกังหันลม (Tower) ส่วนที่เหลือจะกลายเป็นแรงสร้างทอร์ก (Tangential or Torque Force F_{torque}) กระทำต่อใบพัด ในทิศทางเดียวกับการหมุน แรงดังกล่าวนี้เองเป็นตัวทำให้เกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์ ที่กระทำต่อใบพัด จะเห็นว่า ขนาดของทอร์กที่กระทำต่อใบพัด สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการควบคุมเวกเตอร์ v_R ซึ่งสามารถทำได้โดยมุม β, α นั้นเอง

β คือมุมที่ v_B กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมพิช (Pitch Angle) เราสามารถปรับขนาดของมุมนี้ได้ด้วยการปรับใบพัด ให้แกนใบพัดเอียงตัวของสามาถน้อยตามต้องการ ด้วยวิธีทางกล ส่วน α คือมุมที่ v_R กระทำต่อแนวแกนใบพัดเรียกว่ามุมปะทะ (Attack Angle) เราสามารถปรับขนาดของมุมนี้ได้ 2 วิธีคือ ปรับใบพัดโดยวิธีเดียวกับการปรับ β หรือปรับเวกเตอร์ v_R

เวกเตอร์ v_R ประกอบด้วย v_w และ v_B แต่เนื่องจาก v_w คือความเร็วมวลที่กระทำต่อใบพัดในทิศทางตั้งฉากกับระนาบใบพัด ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมขนาดและทิศทางได้ ส่วน v_B คือความเร็วมวลที่ใบพัดมองเห็นเมื่อเกิดการหมุน ดังนั้นจึงสามารถควบคุมได้เฉพาะขนาด โดยการปรับความเร็วรอบของกังหันนั่นเอง ซึ่งจะส่งผลต่อ เวกเตอร์ v_R โดยตรง

2.10.2 ช่วงการทำงานของกังหันลม

ช่วงการทำงานของกังหันลม ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดว่า กังหันลมจะเริ่มและหยุดทำงานเมื่อใดก็คือพลังงานที่กังหันได้รับจากลมในขณะนั้นนั่นเอง โดยกังหันลมจะยังไม่เริ่มทำงานจนกว่าพลังงานที่ได้รับจะมีค่าเพียงพอและจะหยุดการทำงานเมื่อพลังงานที่ได้รับมีค่ามากเกินไป แล้วเนื่องจากพลังงานดังกล่าวแปรผันตามความเร็วมวลที่กระทำต่อกังหัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนกราฟการทำงานของกังหันลมได้ดัง รูปที่ 2-39



รูปที่ 2-39 กราฟการทำงานของกังหันลม

ที่มา : การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกังหันลมฯ,
กรวิทย์, 2549

จากรูปที่ 2-39 จะเห็นว่าในช่วงที่ 1 ความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า V_{cut-in} ดังนั้นกังหันจะไม่ทำงาน เช่นเดียวกับ ช่วงที่ 4 ความเร็วลมมีค่าสูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้กังหันเกิดความเสียหายได้ กังหันจะถูกสั่งให้หยุดทำงานทันที กังหันจะทำงานเมื่อ V_{cut-in} ลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 โดยที่ พลังงานที่สกัดได้ ที่ 100% คือค่าที่คำนวณได้แล้วว่าเมื่อลมมีความเร็วเท่ากับค่าดังกล่าว กำลังที่สกัดได้จะมีค่าเท่ากับพิกัดกำลังพอดี

เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 2 จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมต่ำกว่าพิกัด ซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะแปรผันกันกับความเร็วลมกำลังสาม เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 3 จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วสูงกว่าพิกัด ซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะต้องถูกจำกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังพิกัด โดยใช้วิธีจำกัดพลังงานทางอากาศพลศาสตร์

โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกันก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากลมนดังสมการที่ 2-129

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(v, \omega, \beta) \quad (2-129)$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีการปรับมุมพิซ ดังนั้นที่มุมพิซคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับค่าของ v และ ω เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2-130

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2-130)$$

จะได้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad (2-131)$$

สำหรับทอร์กอากาศพลศาสตร์ T_a เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก ω จะได้

$$T_a = \frac{P_a}{\omega} \quad (2-132)$$

เพราะฉะนั้น T_a จะได้

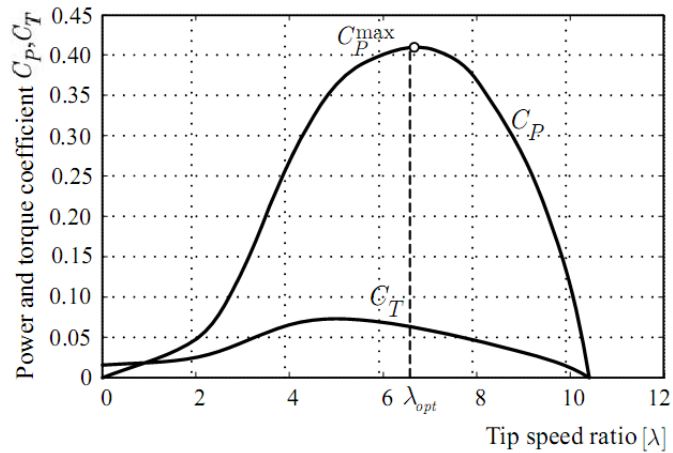
$$T_a = \frac{1}{2} \rho A C_p \frac{v^3}{\omega} \quad (2-133)$$

แทนค่า $\omega = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้

$$T_a = \frac{1}{2} \rho A R \frac{C_p}{\lambda} v^2 = \frac{1}{2} \rho A R C_T v^2 \quad (2-134)$$

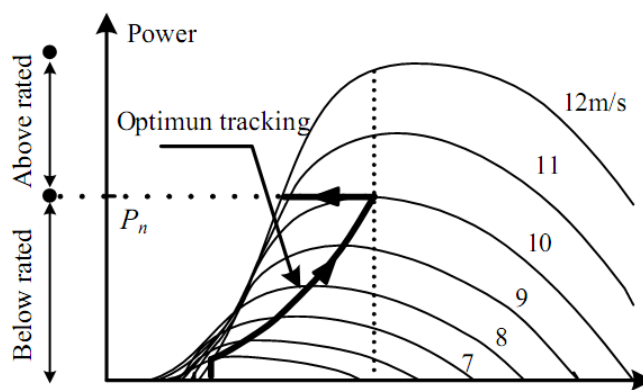
โดยที่ $C_T = \frac{C_p}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ทอร์ก

สำหรับค่า $C_p(\lambda)$ ของกังหันลมจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 2-40



รูปที่ 2-40 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p), สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T) กับค่าแลมด้า (λ)

ที่มา : การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกังหันลมฯ, กรวิทย์, 2549



รูปที่ 2-41 เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ

ที่มา : การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกังหันลมฯ, กรวิทย์, 2549

จากสมการที่ 2-134 และจากกราฟของ C_p จึงสามารถหากราฟคุณลักษณะของกังหันได้ ดังรูปที่ 2-41 ถ้าทราบความเร็วลมที่กระทำต่อกังหัน ก็จะสามารถเลือกทำงานที่ความเร็วรอบอันจะทำให้เกิดการสกัดกำลังตามที่ต้องการได้

2.10.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของกังหันลมโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial Momentum Theory) และทฤษฎีอีลิเมนต์ของใบ (Blade Element Theory) โดยทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่เกิดขึ้นบนกังหันลมส่วนทฤษฎีอีลิเมนต์ของใบได้อธิบายถึงแรงที่กระทำบนชิ้นส่วนเล็กๆของใบกังหันลมแต่ละใบ เมื่อนำทฤษฎีทั้งสองมารวมกันสามารถคำนวณหาสมรรถนะของกังหันลมและใช้ในการออกแบบกังหันลมได้ ซึ่งมีหลักการดังนี้

1. แรงกระทำบนวัตถุเนื่องจากของไหล

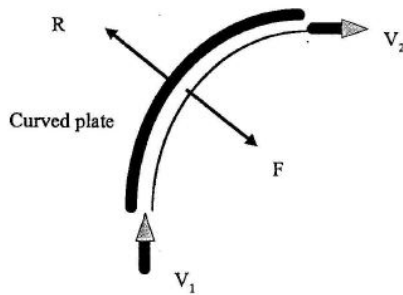
จากหลักการของการกระทบและโมเมนตัม

$$Fdt = d(mV) \quad (2.135)$$

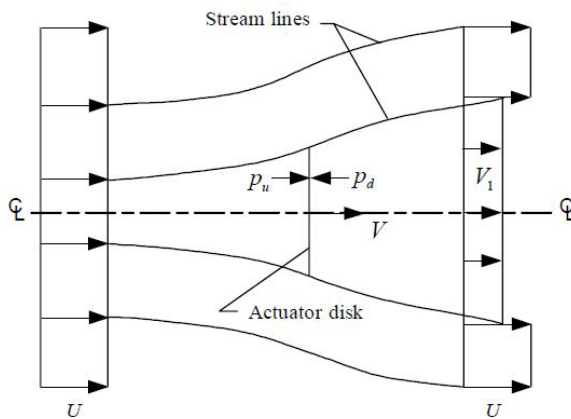
ในกรณีของการไหลแบบคงที่ของของไหล ในปริมาตรควบคุมของท่อกระแส (Stream Tube) สามารถอินทิเกรตสมการ (2.135) และเขียนใหม่ได้เป็น

$$F = \rho Q(V_2 - V_1) \quad (2.136)$$

เมื่อไม่คิดแรงเสียดทาน และน้ำหนักของของไหล และกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงที่



รูปที่ 2-42 หลักการของโมเมนตัม



รูปที่ 2-43 แบบจำลองการไหลผ่าน Actuator disk

2. ทฤษฎีของ Rankine-Froude

แบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับกังหันลม คือ แบบจำลอง Actuator disk ดังรูปที่ 2-43 ซึ่งนิยามให้โรเตอร์ของกังหันลมเป็น disk เอกพันธ์ กระแสลมที่ไหลผ่าน Actuator disk จะถูกต้าน และเกิดการล้นออกด้านข้าง จึงเป็นเหตุให้เส้นกระแสถูกเหนี่ยวให้มีลักษณะดังรูปที่ 2-43 ทฤษฎีนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Rankine ในปี ค.ศ. 1895 เพื่อที่จะอธิบายลักษณะความเร็วต้นกระแส (Up stream) และ ท้ายกระแส (Down stream) ของโรเตอร์จากทฤษฎี Axial momentum กำหนดการไหลของกระแสลมที่ไหลผ่านกังหันลมเป็นแบบเอกรูป (Uniform) ให้ความเร็วลมที่กระแสนอิสระ (Free-stream) มีค่าเป็น V_0 ความเร็วลมจะลดลงเมื่อไหลผ่านใบกังหัน เมื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และ สมการอนุรักษ์พลังงาน ภายใต้สมมติฐานให้มีเฉพาะการไหลในแนวแกน (อยู่ในแนวตั้งฉากกับโรเตอร์ของกังหันลม) และไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Rotational motion)

สมการของแรงตั้งฉาก (Thrust force) สามารถหาได้จาก 2 หลักการ คือ

ทฤษฎี Momentum

$$F_T = \dot{M}_D(V_0 - V_1) = \rho A_D V (V_0 - V_1) \quad (2.136)$$

เมื่อ	F_T	คือ	แรงตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นดิสก์ [N]
	\dot{M}_D	คือ	อัตราการไหลของมวลผ่านแผ่นดิสก์ [kg/s]
	V_0	คือ	ความเร็วลมที่แผ่นดิสก์ [m/s]
	V_1	คือ	ความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่เกิดคลื่นท้าย (wake) [m/s]
	A_D	คือ	พื้นที่ของแผ่นดิสก์ [m ²]
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ [kg/v ³]

ความดันตกกระทหว่าง Actuator disk

เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับ Actuator disk จะได้

$$F_T = A_D V (P_u - P_d) \quad (2.137)$$

เมื่อ P_u และ P_d คือ ความดันที่ต้นกระแส และ ท้ายกระแสของ Actuator disk [N/m²] จากรูปที่ 2-43 แสดงลักษณะของ Stream tube ของกระแสที่ไหลผ่าน Actuator disk แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือต้นกระแส และ ท้ายกระแส เมื่อนำสมการของเบอร์ Bernoulli มาใช้หาค่าความดันที่กระทำกับแผ่นดิสก์ทั้งสองด้าน ส่วนแรกวิเคราะห์ความดันที่ต้นกระแส เริ่มพิจารณาตั้งแต่กระแสอิสระ (Free-stream) จนถึงด้านต้นลมของแผ่นดิสก์ ในส่วนที่ 2 วิเคราะห์ความดันท้ายกระแส เริ่มพิจารณาตั้งแต่ด้านท้ายลมของแผ่นดิสก์จนถึงบริเวณคลื่นท้ายอย่างไกล (Far-wake)

คลื่นท้าย คือ บริเวณในสวนท้ายกระแส สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ คลื่นท้ายอย่างใกล้ (Near-wake) และ คลื่นท้ายอย่างไกล ซึ่งคลื่นท้ายอย่างใกล้ คือ บริเวณตั้งแต่ด้านหลังของ Actuator disk ห่างออกไปเป็นระยะเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหมุน ซึ่งบริเวณนี้จะได้รับผลกระทบเนื่องจากการหมุนของส่วนหมุนเป็นอย่างมาก และ คลื่นท้ายอย่างไกล คือ ส่วนที่อยู่ถัดจากคลื่นท้ายอย่างใกล้ไปทางท้ายกระแส

ส่วนที่ 1: ต้นกระแสถึงด้านต้นลมของ Actuator disk

$$P_\infty + 0.5\rho U^2 = P_u + 0.5\rho V^2 \quad (2.138)$$

ส่วนที่ 2: ด้านท้ายลมของ Actuator disk ถึงคลื่นท้ายอย่างไกล

$$P_\infty + 0.5\rho V^2 = P_d + 0.5\rho V^2 \quad (2.139)$$

นำสมการ (2.138) – (2.139) ได้สมการ

$$P_u - P_d = 0.5\rho(U^2 - V_1^2) \quad (2.140)$$

จากนั้นแทนค่าสมการ (2.140) ลงในสมการ (2.141) ได้

$$F = 0.5\rho A_D (U^2 - V_1^2) \quad (2.141)$$

เมื่อนำสมการ (2.136) รวมกับสมการ (2.141) ได้

$$V = 0.5(U + V_1) \quad (2.142)$$

จากสมการ (2.142) พบว่าความเร็วที่ Actuator disk คือ ค่าเฉลี่ยระหว่างความเร็วที่กระแสน้ำและความเร็วที่คลื่นท้ายอย่างไกล ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่กระแสน้ำและ ความเร็วที่ Actuator disk สามารถเขียนได้ในรูป

$$U - V = aU \quad (2.143)$$

โดยที่ a คือ ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน (Axial induction factor)

เมื่อแทนค่าสมการ (2.142) ลงในสมการ (2.143) จะได้

$$U - 0.5(U + V_1) = aU \quad (2.144)$$

$$0.5(U - V_1) = aU \quad (2.145)$$

$$U - V_1 = 2(U - V) = 2aU \quad (2.146)$$

หรือ $V_1 = U(1 - 2a) \quad (2.147)$

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ กำหนดให้เป็นการไหลแบบอนุกรมที่และความดันที่คลื่นท้ายเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นจะสามารถหางานได้จาก

$$P = 0.5\rho A_D (V_0^2 - V_1^2) V_D = 0.5\rho A_D V_D (V_0 + V_1)(V_0 - V_1) \quad (2.148)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) จากทฤษฎี Rankine-Froude มีค่าเท่ากับ

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho V_0^3 A} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.149)$$

ซึ่ง C_p จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $a = 1/3$ ดังนั้น

$$C_{P,\max} = 4 \times \left(\frac{1}{3}\right) \times \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.150)$$

ค่าคงที่นี้เรียกว่า Betz limit เป็นเสมือนค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม แต่ยังไม่ใช่ค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดอย่างแท้จริง เพราะเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.20) ค่า C_p คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่กังหันลมสามารถสกัดได้จากลม เทียบต่อ กำลังของลมทั้งหมด ซึ่งพิจารณาในขณะที่ไม่มีวัตถุขวางการไหล ดังนั้นที่ Actuator disk จึงมีอัตราการไหลเป็น $\rho U A_D$

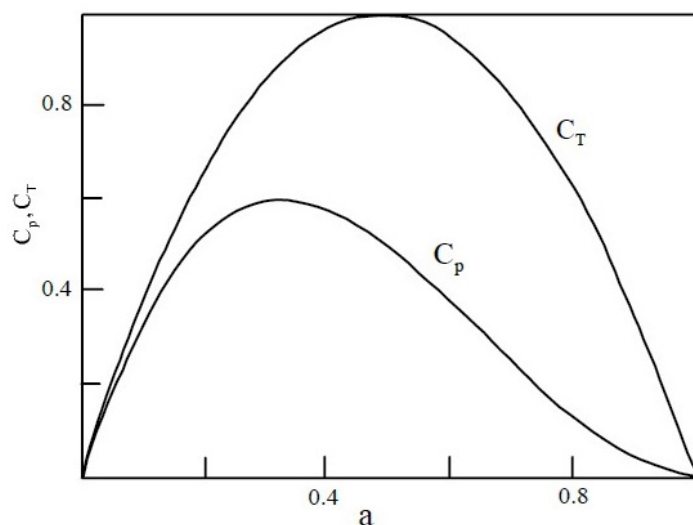
ในความเป็นจริงอัตราการไหลที่ Actuator disk ควรจะมีค่าเท่ากับ $\rho U A_D$ จึงเป็นที่มาของการนิยามประสิทธิภาพของ Actuator disk ดังนี้

$$\eta_D = \frac{F_T \cdot V}{0.5 \rho U^2 V A_D} = 4a(1-a) \quad (2.151)$$

จากสมการที่ (2.151) หากพิจารณาในแง่ของแรงจะได้ สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉาก (Trust coefficient) ดังนี้

$$C_T = \frac{F_T}{0.5 \rho U^2 A_D} = 4a(1-a) \quad (2.152)$$

เมื่อค่า a มากกว่า 0.5 หรือน้อยกว่า 0.5 จะทำให้ค่า C_T ลดลงเนื่องจากเกิดความเร็วคลื่นท้าย (V_1) ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียให้แรงมีค่าลดลง ส่วนค่า a ที่ให้ค่า C_T มากที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 0.5 จาก $V_1 = U(1-2a)$ นั่นคือ ในสภาวะดังกล่าวไม่เกิดความเร็วคลื่นท้าย แรงที่ได้จึงมีค่าสูงสุด



รูปที่ 2-44 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_T และ a

ในการจำลองในแบบ Actuator disk ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงที่สุดคือ 16/27 (Betz limit) โดยที่พิจารณาจำนวนใบพัดของกังหันลมมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น Betz limit จึงมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากในทางปฏิบัติ เพราะในความเป็นจริงกังหันลมมีจำนวนใบพัดที่จำกัด และเกิดแรงกระทำบนใบพัดนอกจากแรงยก เรียกว่า แรงต้าน

3. ทฤษฎีของ Glauert

ในปี 1935 Glauert ได้พัฒนาทฤษฎี Momentum โดยปรับปรุงแบบจำลอง Actuator disk ให้เหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์กังหันลม บางครั้งจึงเรียกทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎี Glauert momentum โดยพิจารณาให้มีเฉพาะแรงยกที่กระทำบนใบกังหันลม และมีการไหลหมุนวนในบริเวณคลื่นท้าย ดังนั้น แรงตั้งฉาก (Trust) และ แรงบิด จึงหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงแกน (Axial momentum) และ โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) ภายในวงแหวน (Annular ring) ตามลำดับ ดังสมการ

$$dT = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 C_L \cos \phi dr \tag{2.153}$$

และ
$$dQ = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 C_L \sin \phi r dr \tag{2.154}$$

เมื่อ	dT	คือ	อนุพันธ์ของแรงตั้งฉาก (N)
	dQ	คือ	อนุพันธ์ของแรงบิด (N-m)
	W	คือ	ความเร็วลมสัมพัทธ์ (m/s)
	c	คือ	ความยาวเส้นคอร์ดที่รัศมีใด ๆ (m)
	B	คือ	จำนวนใบกังหัน

จากสมการ (2.153) และ (2.154) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$dT = 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr \tag{2.155}$$

และ
$$dQ = 4a'(1-a)\rho V_0^2 \pi r^3 \omega dr \tag{2.156}$$

ซึ่งอนุพันธ์ของกำลังงานที่คำนวณได้ในย่านวงแหวน หาได้จากสมการ

$$dP = \Omega dQ = \Omega r \rho V_d (r \omega) (2\pi r dr) \tag{2.157}$$

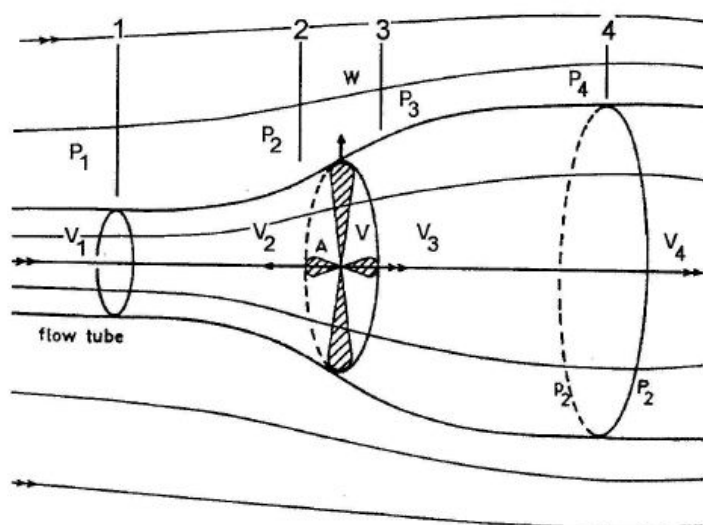
เมื่อ dP คือ อนุพันธ์ของงานในย่านวงแหวนที่ r ใด ๆ (W)
 โดยที่ $a' = \frac{\omega}{2\Omega'}$ ค่าการเหนี่ยวนำเชิงมุม (Angular induction factor)

4. ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial Momentum Theory)

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน ได้ถูกอธิบายขึ้นครั้งแรกโดย แร็งคิน (Rankine) ในปี ค.ศ. 1865 และต่อมาได้ถูกปรับปรุงโดย ฟรูด (Froude) ทฤษฎีนี้ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อกังหันลมกับความเร็วของการไหลที่ไหลผ่านกังหันลม ต่อมา เบ็ตซ์ (Betz) ได้นำผลกระทบจากการหมุนของเวก (Wake Rotation) และการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip loss) รวมเข้าในทฤษฎีนี้ด้วย

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนได้ถูกกำหนดขึ้นภายใต้สมมติฐานดังนี้

- ตัวกลางหรืออากาศยุบตัวไม่ได้
- ไม่มีความหนืดหรือแรงต้านต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ
- อากาศมีการไหลเป็นแบบเนื้อเดียวกันตลอด
- ความดันสถิตที่ตำแหน่งไกลมาก ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกังหันลมมีค่าเท่ากับความดันสถิตของอากาศที่ไม่ถูกรบกวนด้วยกังหันลม
- ไม่มีการหมุนของลำอากาศด้านหลังของกังหันลม



รูปที่ 2-45 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านเข้า-ออกกังหันลม

พิจารณาลำอากาศ (Stream tube) ดังรูปที่ 2-45 จากกฎความต่อเนื่องของการไหล จะได้

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V_{ax} = \rho A_2 V_2 \quad (2.158)$$

เมื่อ V_{ax} = ความเร็วลมแนวแกนเพลลา (Axial Velocity)

แรงที่กระทำตามแนวแกน (Thrust, T) บนกังหันลมที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม

$$T = \rho A_1 V_1^2 - \rho A_2 V_2^2 \quad (2.159)$$

จากสมการที่ (2.158) จะได้

$$T = \rho A V_{ax} (V_1 - V_2) \quad (2.160)$$

แรงตามแนวแกนที่เกิดจากผลต่างของความดัน

$$T = (P^+ - P^-) A \quad (2.161)$$

จากสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation)

$$\text{ด้านหน้าของกังหันลม} \quad : \quad P + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P^+ + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 \quad (2.162)$$

$$\text{ด้านหลังของกังหันลม} \quad : \quad P^- + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 = P + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2.163)$$

จากสมการที่ (2.162) และ (2.163) จะได้

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.164)$$

นำสมการ (2.164) แทนลงในสมการที่ (2.161) จะได้

$$T = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.165)$$

จากสมการ (2.165) และ (2.160) จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$V_{ax} = \frac{1}{2} \rho (V_1 - V_2) \quad (2.166)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าרבวกรระแสมตามแนวแกน (Axial induction factor, a) มีค่าเท่ากับ

$$\left(1 - \frac{V_{ax}}{V_1}\right) \text{ จะได้}$$

$$V_{ax} = V_1(1 - a) \quad (2.167)$$

แทนสมการที่ (2.167) ลงในสมการที่ (2.166) จะได้

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (2.168)$$

กำลังงานที่กังหันลมได้รับ มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์

$$Power = \frac{1}{2} \rho A V_{ax} (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.169)$$

จากสมการที่ (2.167) และสมการที่ (2.168) เมื่อแทนลงในสมการที่ (2.169) จะได้

$$Power = 4a(1 - a)^2 \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (2.170)$$

จากสมการที่ (2.170) สามารถหาค่ากำลังงานสูงสุดได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่

(2.171) เทียบกับ a จะได้ a ที่ให้ค่ากำลังงานสูงสุดเท่ากับ $\frac{1}{3}$ นำค่า a ที่ได้แทนลงในสมการที่ (2.171) จะได้

$$Power = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A V_1^3 \right) \quad (2.171)$$

ให้สัมประสิทธิ์ของกำลัง (Power coefficient, C_p) เท่ากับ

$$C_p = P / \left(\frac{1}{2} \rho A V_1^3 \right) \quad (2.172)$$

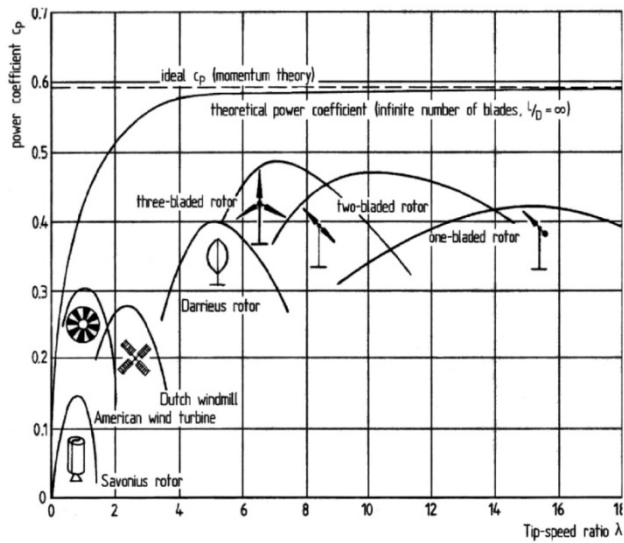
นำสมการที่ (2.170) แทนลงในสมการที่ (2.172) จะได้

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.173)$$

ค่า C_p สูงสุดมีค่าเท่ากับ $\frac{16}{27}$ หรือ 0.5926 ซึ่งเรียกค่านี้ว่า สัมประสิทธิ์สูงสุดของ Betz ได้

จากสมมติฐานว่ากังหันลมมีลักษณะดังนี้

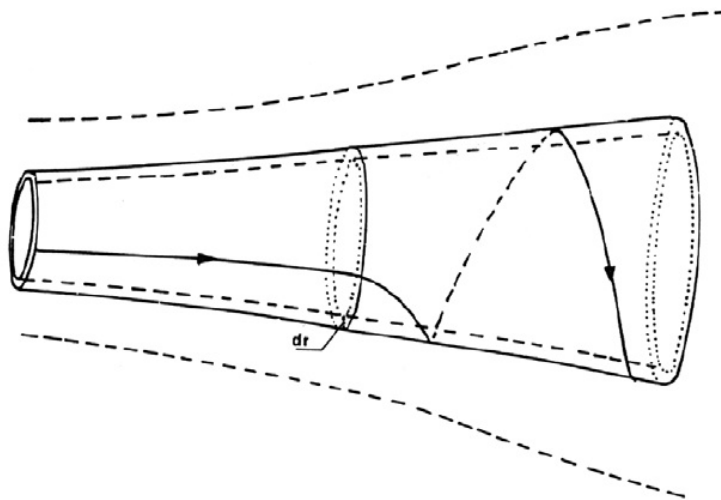
- มีค่าอัตราเร็วปลายใบสูง
- มีจำนวนใบพัดเป็นอนันต์
- มีแรงดูดบนใบพัดเป็นศูนย์



รูปที่ 2-46 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันแบบต่างๆ

5. ทฤษฎีล้าอากาศหมุน (Wake Rotation)

เมื่อพิจารณาอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมจะสังเกตได้ว่าล้าอากาศที่ไหลผ่านด้านหน้ากังหันลม มีแต่ความเร็วตามแนวแกนเท่านั้น แต่เมื่ออากาศไหลผ่านกังหันลมแล้ว บริเวณด้านหลังของกังหันลมนั้นอากาศจะมีความเร็วทั้งในทิศทางตามแนวแกนและในทิศทางเชิงมุม



รูปที่ 2-47 แสดงการเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณด้านหลังกังหันลม เนื่องจากการหมุนของกังหันลม

จากรูปที่ 2-47 เมื่อพิจารณาวงแหวนที่มีรัศมี r และมีความหนา dr พื้นที่หน้าตัดของลำอากาศ (Annular Tube) มีค่าเท่ากับ $2\pi r dr$ ถ้าใช้สมการของเบอร์นูลลีมาวิเคราะห์ความแตกต่างของความดันสถิตที่เกิดขึ้นบนก้านหมุน เมื่อความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นจาก Ω ไปเป็น $\Omega + \omega$ จะได้

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega)^2 r^2 - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2$$

หรือ

$$P^+ - P^- = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (2.174)$$

นำสมการที่ (2.174) แทนลงในสมการที่ (2.161) จะได้แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นบนก้านหมุน คือ

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 2\pi r dr \quad (2.175)$$

กำหนดให้ค่าการรบกวนกระแสลมเชิงมุม (Rotation Interference Facto, a') เท่ากับ

$$a' = \frac{1}{2} \frac{\omega}{\Omega} \quad (2.176)$$

เมื่อจัดสมการที่ (2.176) ใหม่จะได้

$$dT = 4a'(1+a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (2.177)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.165) (2.166) และ (2.169) โดยให้ V_1 มีค่าเท่ากับ V และพิจารณาพื้นที่ A มีค่าเท่ากับ $2\pi r dr$ จะได้

$$dT = 4a(1-a) \frac{1}{2} \rho V^2 2\pi r dr \quad (2.178)$$

โมเมนต์บิด (Torque) ที่เกิดขึ้นบนส่วนวงแหวนของก้านหมุนสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$dQ = (dm) \omega r * r = \rho V_{ax} 2\pi r dr \omega r^2 \quad (2.179)$$

เมื่อนำค่า a และ a' แทนลงในสมการ (2.156) และจัดรูปใหม่จะได้

$$dQ = 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho V \Omega r^2 2\pi r dr \quad (2.180)$$

6. การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss)

การสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันบริเวณด้านหลังใบก้าน ซึ่งมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และด้านหน้าใบซึ่งมีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นบริเวณ

ปลายใบพบว่าเมื่ออากาศไหลวนจากความดันสูงไปหาความดันต่ำ ทำให้ความดันที่ปลายใบทั้งด้านหลังใบกึ่งหันลมและด้านหน้าใบกึ่งหันลมมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ ส่งผลให้แรงยกมีค่าต่ำลง และเรียกผลที่เกิดขึ้นว่า การสูญเสียที่ปลายใบ

Wilson (1974) กล่าวว่า เพรนทัล (Prandtl) ได้คิดสมการการสูญเสียปลายใบโดยให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ F คือ

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \exp \left(-\frac{1}{2} B(R-r) / r \sin \phi \right) \right\} \quad (2.181)$$

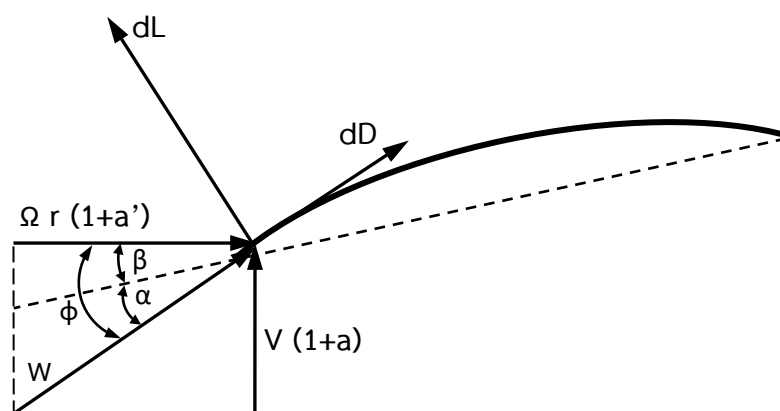
ในเวลาต่อมา Jensen (1976) ได้พัฒนารูปแบบของเพรนทัลและได้อธิบายถึงการลดรูปของสมการที่ติดอยู่ในรูปของเอ็กซ์โปเนนเชียลของรัศมี R และ r ให้อยู่ในรูปค่าคงที่ดังนี้

$$F = \left\{ 1 - \frac{1.386}{B} \sin(\phi/2) \right\}^2 \quad (2.182)$$

7. ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Blade Element Theory)

ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Lysen, 1982) เป็นทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้คำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนเล็กๆของใบ โดยมีข้อสมมติฐานว่า แรงที่เกิดขึ้นบนใบกึ่งหันนั้นมีเฉพาะแรงยก (Lift Force) และ แรงต้าน (Drag Force) เท่านั้น ใบกึ่งหันลมแต่ละใบเป็นอิสระต่อกันซึ่งไม่มีผลรบกวนจากใบข้างเคียง

ดังนั้น การหาแรงตามแนวแกนและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นที่ใบทั้งหมดนั้นทำได้โดยการอินทิเกรตตลอดความยาวของใบกึ่งหันลม



รูปที่ 2-48 ความเร็วลมและแรงที่กระทำบนใบกึ่งหันลม

แรงยกและแรงต้านเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.183)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.184)$$

จากรูปที่ 2-48 แรงตามแนวแกนและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นบนใบพัด สามารถเขียนได้ดังนี้

$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (2.185)$$

$$dQ = (dL \sin \phi - dD \cos \phi) r \quad (2.186)$$

เมื่อนำ dL และ dD จากสมการที่ (2.183) และ (2.184) แทนลงในสมการ (2.185) และ (2.186) ตามลำดับแล้วสมมติให้กังหันลมมีจำนวนใบพัด B ใบ จะได้

$$dT = \frac{1}{2} B c \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (2.187)$$

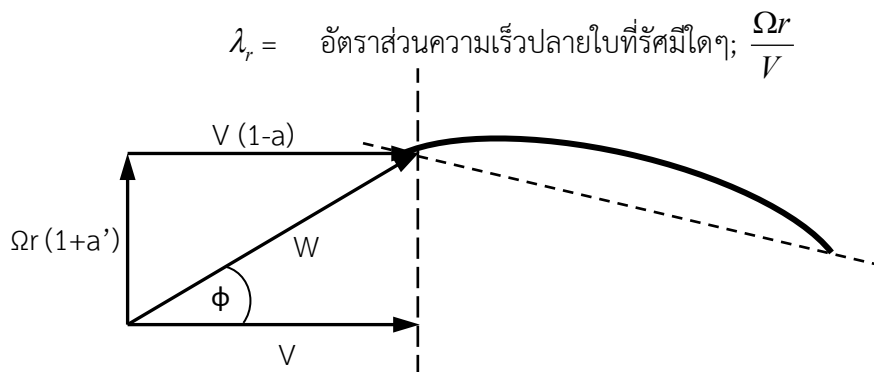
$$dQ = \frac{1}{2} B c \rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \quad (2.188)$$

8. การรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Combination of Momentum Theory and Blade Element Theory)

การรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบเข้าด้วยกัน เพื่อนำผลที่ได้จากทฤษฎีทั้งสองไปวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลม (Lysen, 1982) พิจารณารูปที่ 2-49 จะได้

$$W = V \sin \phi + r \Omega \cos \phi = V (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi) \quad (2.189)$$

เมื่อ



รูปที่ 2-49 แผนภาพความเร็วลมที่เกิดขึ้นบนใบพัดใบหนึ่งของกังหันลมแกนระดับ

$$W = \frac{(1-a)V}{\sin \phi} = \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \phi} \quad (2.190)$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V}{(1+a')r\Omega} = \frac{(1+a)}{(1+a')\lambda_r} \quad (2.191)$$

$$\frac{w \cos \phi}{W \sin \phi} = \frac{a}{1-a} \quad (2.192)$$

พิจารณาแรงตามแนวแกนและโมเมนต์บิดจากทฤษฎีโมเมนต์และทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ จากสมการที่ (2.178), (2.179), (2.187), (2.188) และ (2.189) ตามลำดับ

ทฤษฎีโมเมนต์ :

$$dT = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr$$

$$dT = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr$$

$$dQ = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho V\Omega r^2 2\pi r dr$$

ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ :

$$dT = \frac{1}{2}Bc\rho W^2(C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)dr$$

$$dQ = \frac{1}{2}Bc\rho W^2(C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)rdr$$

จากสมการที่ (2.178) และสมการที่ (2.187) โดยให้ C_D มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

$$4a(1-a)\frac{V^2}{W^2} = \sigma C_L \cos \phi \quad (2.193)$$

เมื่อ σ คือ อัตราส่วนโซลิดิตี (Solidity Ratio)

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (2.194)$$

แทนค่า V จากสมการที่ (3.190) ลงในสมการที่ (3.192) จะได้

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma C_L \cos \phi}{4 \sin^2 \phi} \quad (2.195)$$

หรือ

$$\frac{w}{W} = \frac{\sigma C_L}{4 \sin \phi} \quad (2.196)$$

จากแผนภาพความเร็วในรูปที่ 2-49 จะได้

$$\Omega r = W \cos \phi - w \sin \phi$$

และ

$$V = W \sin \phi + w \cos \phi$$

ถ้าให้ $\lambda_r = \frac{\Omega r}{V}$ จะได้

$$\lambda_r = \frac{1 - \left(\frac{w}{W}\right) \tan \phi}{\tan \phi + \frac{w}{W}} \quad (2.197)$$

อัตราส่วนของความเร็วลมสัมพันธ์จากสมการที่ (2.196) อยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานที่อากาศบริเวณของกังหันลมจะไม่มีลมหมุน และใบกังหันลมแต่ละใบเป็นอิสระต่อกันซึ่งไม่มีผลรบกวนจากใบข้างเคียง แต่ในความเป็นจริงแล้วบริเวณด้านหลังของกังหันลมจะเกิดความแตกต่างของความดันขึ้นเป็นผลให้เกิดการสูญเสียที่บริเวณปลายใบ ดังนั้นในการหาค่าของอัตราส่วนของความเร็วลมสัมพันธ์ให้ถูกต้องนั้นจะต้องคูณสมการที่ (2.196) ด้วยค่า F จากสมการที่ (2.182) จะได้

$$\frac{w}{W} = \frac{\sigma C_L}{4F \sin \phi} \quad (2.198)$$

จากความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิด

$$Cq = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho V^2 \pi R^3}$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิดในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Torque) ได้ดังนี้

$$\frac{dCq}{dx} = 2\sigma \left(\frac{W}{V}\right)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (2.199)$$

แทนค่า W จากสมการ (2.190) ลงในสมการ (2.199) จะได้

$$\frac{dCq}{dx} = 2\sigma x^2 (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (2.200)$$

เมื่อ

$$x = \text{เป็นอัตราส่วนของรัศมีที่ตำแหน่งใดๆ; } \frac{r}{R}$$

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิทธิชัย บุญพิทักษ์และคณะ (2550) เสนอการออกแบบและการสร้างชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบแรงดันต่อความถี่ที่มีการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน โดยใช้ตัวประมวลผลดิจิทัล เบอร์ TMS320F2812 ในการสร้างสัญญาณในการควบคุมนั้นได้ทำการสร้างโมเดลจำลองจากโปรแกรม Matlab/simulink แล้วทำการเชื่อมต่อผ่านตัวประมวลผลดิจิทัลมายังภาคขับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในที่นี้จะได้อินเวอร์เตอร์แบบแรงดันด้านเข้า 1 เฟส โดยใช้ไอจีบีที เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง จากการทดลองโดยควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขดลวดวาวด์โรเตอร์ ที่มีขนาด 220 วัตต์ สามารถควบคุมความเร็วได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1,115 รอบต่อนาที

จิรพงษ์ จิตตะโคตร (2547) เสนอการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการปรับค่าความต้านทานสเตเตอร์การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสมรรถนะสูงนั้นต้องการ การประมาณค่าฟลักซ์ในมอเตอร์ที่แม่นยำ ซึ่งการประมาณค่าฟลักซ์นั้นจะมีค่าความผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานสเตเตอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเร็วต่ำ จึงเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ซึ่งผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองยืนยันความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอ

สิโรจน์ ใจขาน (2552) นำเสนอแบบจำลองพลวัตทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลองสมการลำดับที่ 3 แบบจำลองทั้งสองได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนของกรณีศึกษาสถานะชั่วคราวได้ทำการจำลองการลัดวงจร 3 เฟส และการต่อตัวเก็บประจุที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 ให้ผลตอบสนองชั่วคราวที่ดีกว่าและเหมาะสมในการใช้เพื่อศึกษาการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้า

พันรบ ชินบุตร (2548) นำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง สำหรับผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมโดยใช้ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงย่านที่ต้องการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุตามขนาดภาระทางไฟฟ้าและขนาดของระดับความเร็วรอบที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้ยืนยันว่าการทดสอบมีความน่าเชื่อถือจริง

รุ่งวิชา ไชยยศ (2549) ศึกษา ค้นคว้า ออกแบบ และสร้างอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับให้สามารถทำงานได้ทั้งแบบอินเตอร์มอดูเลชันและโอเวอร์มอดูเลชัน สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของการทำงานแบบโอเวอร์มอดูเลชัน เพื่อเป็นฐานความรู้ในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับให้สามารถควบคุมการทำงานแบบป้อนกลับได้ เช่น การควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct torque control, DTC) ทั้งยังเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานอินเวอร์เตอร์ชนิดแรงดันสูง

ณัฐพงศ์ เมืองจันทร์และ วิจิตร กิรินทร์ (255) เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วบนระบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัว โดยนำความแตกต่างของสถานะฟลักซ์โรเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองแรงดัน และที่ได้จากแบบจำลองกระแสเข้าไปปรับเอาต์พุตของค่าประมาณความเร็วรอบโดยผ่านกระบวนการควบคุมแบบพีไอ โดยแนวทางวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยการออกแบบอัตราขยายระบบประมาณค่าความเร็ว โดยพิจารณาถึงความเร็วประมาณติดตามความเร็วจริง ในช่วงมอเตอร์เปลี่ยนความเร็วรอบ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของการออกแบบอัตราขยายนี้ ได้นำไปทดสอบระบบจริงกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยควบคุมผ่านชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ซึ่งจากการทดสอบพบว่า เป็นไปตาม แนวคิดที่ได้นำเสนอและให้สมรรถนะการตอบสนองทางพลวัตที่ดี

ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข (2553) ออกแบบและจัดทำชุดฝึกด้านวิศวกรรมศึกษาด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยมีการทดลองของแต่ละวงจรสามารถทำงานได้โดยการเปลี่ยนสวิตช์กำลังและอุปกรณ์พาสซีฟด้วยรีเลย์ เพื่อความสะดวกในการทำการทดลอง ลดเวลา และอุปกรณ์ทดลอง การสร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน (PWM) สำหรับมอสเฟตกำลัง จะใช้ความสามารถของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ผ่านโปรแกรม Matlab/Simulink ที่มีการควบคุมแบบทันเวลา ทำให้มีความสะดวกในการสร้างสัญญาณ PWM

วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล (2552) นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยนำอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้หลักการควบคุมแบบสเกลาร์ด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่ เพื่อควบคุมและรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาให้มีขนาดคงที่เมื่อความเร็วรอบจากตัวขับเคลื่อนกำลังหรือโหลดเปลี่ยนแปลง จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความสามารถในการรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองให้คงที่ได้

ณัฐภัทร พันธุ์คง (2545) นำเสนอการนำวิธีการสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันมาใช้แก้ปัญหาการกระเพื่อมของแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ตัวอินทิเกรตที่ปรับตัวได้มาคำนวณหาตำแหน่งแรงแม่เหล็ก เพื่อแก้ปัญหาการขยับเลื่อนและการอิมิตัวของเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ที่เกิดจากตัวอินทิเกรตเพียงอย่างเดียว ด้วยวงจรกรองแบบผ่านต่ำลำดับหนึ่ง เพื่อเป็นตัวชดเชยขนาดและมุมเฟสของเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ให้ถูกต้อง โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ADMC331 เป็นอุปกรณ์ควบคุม ผลการทดสอบสามารถแก้ปัญหาการกระเพื่อม การขยับเลื่อน และการอิมิตัวได้ ส่งผลให้การควบคุมมอเตอร์ถูกต้องและเป็นไปอย่างราบเรียบ

จิรพงษ์ จิตตะโคตร และคณะ (2550) นำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบปรับแรงดันและความถี่ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมที่ควบคุมแรงดันในแกนดีและแกนควให้มีอิสระต่อกัน โดยใช้ DSP รุ่น TMS320F243 เป็นตัวประมวลผลที่รวดเร็วกว่า

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์มอสเฟต ได้ใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ที่ดับบลิวเอ็ม ซึ่งจะให้ค่าแรงดันอินเวอร์เตอร์มากกว่าแบบไซน์ซออย และยังได้มีการแก้ผลของการประวิงเวลาสวิตช์มอสเฟตด้วยเพื่อป้องกันการลัดวงจร จากผลการจำลองและผลการทดสอบจริงสามารถยืนยันความถูกต้องดังที่ได้นำเสนอ

สรรพล คุ่มทรัพย์ และคณะ (2553) นำเสนอเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real-time โดยใช้วิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้เหมือนกับแรงบิดที่เกิดจากกังหันลมจริง โดยการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด ของกังหันลม โดยใช้วิธีการสร้างแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) ควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Matlab/Simulink ส่งข้อมูลผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซแบบทันเวลา (Real Time) ไปที่ตัวอินเวอร์เตอร์สั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 kW สร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดของกังหันลม ทำให้สามารถสร้างเครื่องจำลองการทำงานของกังหันลมได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริง

พิเชษฐ ฉัตรพาน (2548) เสนอการออกแบบและจำลองแบบการทำงานของระบบการควบคุมเวกเตอร์ของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกังหันลมทั้งแบบที่ทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส และแบบที่ทำงานด้วยตนเองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสส่วนการปรับปรุงทางด้านระบบควบคุมได้ทำการควบคุมประสิทธิภาพ โดยการควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็กให้เท่ากับการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำโดยการควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ให้เหมาะสมกับโหลด การปรับปรุงทางด้านวงจรกำลังและระบบควบคุม ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง มีประสิทธิภาพสูง มีย่านการควบคุมความเร็วรอบที่กว้าง สามารถควบคุมให้กลับทิศทางหมุนได้อย่างอัตโนมัติ ที่พิกัดสูง

องค์อร์ รัตนถาวร (2547) ทำการศึกษาการทำงานของระบบกังหัน ร่วมกับการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบป้อนสองทาง (Doubly-Fed Induction Generator) เพื่อทำหน้าที่แปลงพลังงานและควบคุมความเร็วของกังหัน โดยนำเสนอความไม่เสถียรและความไม่เป็นเชิงเส้นของกังหันเมื่อเกิดการสตอลจากนั้นจะชี้ให้เห็นถึงตัวควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งบทความนี้นำเสนอสองแบบคือ ตัวควบคุมป้อนล่วงหน้า (Feedforward) และตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy) โดยจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

วิกันดา ศรีเดช (2551) เสนอแนวทางการหาค่ามุมเอนที่ที่ดีที่สุดของใบกังหันโดยใช้วิธีการเชิงทฤษฎีร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด ทฤษฎีสำคัญที่ใช้คือ ทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษา MATLAB เพื่อใช้

เปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะคือกังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมแบบใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหามุมเอนที่ดีที่สุดใตสถิติลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมเอนไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุดจากนั้นได้คำนวณหามุมเอนที่ดีที่สุดใตสถิติลมเปลี่ยนไปจากเดิม โดยยังมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิมแต่มีความเบ้ของสถิติลมต่างไปจากเดิม พบว่ามุมเอนที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิมทั้งนี้ น่าเป็นสาเหตุจากการที่ค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไปตามความเบ้ของสถิติลม

กรวิทย์ กระจำพันธ์ (2549) ได้ศึกษาการทำงานขอระบบกังหันลมร่วมกับแบบจำลองกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยนำเสนอความไม่เสถียรและความไม่เป็นเชิงเส้นของกังหันเมื่อเกิดการสต่อจากนั้นจะชี้ให้เห็นถึงตัวควบคุม ซึ่งงานวิจัยนี้นำเสนอสามแบบคือตัวควบคุมแบบติดตามกำลังสูงสุด (MPPT) ตัวควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed forward) และตัวควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy) ทำการทดลองโดยใช้ Digital signal controller (DSC) เพื่อใช้ในการควบคุมกังหันลม

สรรพล คุ่มทรัพย์ และคณะ (2553) ทำการสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบทันเวลา (Real-time) มีการควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซ โดยการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดของกังหันลม ซึ่งการควบคุมทำงานผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มีการส่งข้อมูลผ่านการติดต่ออินเตอร์เฟซออกมาในรูปแบบทันเวลาไปที่ชุดอินเวอร์เตอร์ และสั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดของกังหันลม

เมืองมนต์ เนตรหาญ และ อำไพศักดิ์ ทิบุญญา (2553) ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า ให้มีความเหมาะสมกับความเร็วลมต่ำตามศักยภาพพลังงานลมของจังหวัดนครพนม โดยได้ออกแบบกังหันลมชนิดแกนนอน มีพิกัดในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 800 วัตต์ ระบบที่ออกแบบเน้นความง่ายไม่ซับซ้อน บำรุงรักษาง่าย ใช้วัสดุในประเทศ และต้นทุนต่ำ ทำการติดตั้งเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพกังหันลม ที่ระดับความสูง 14 เมตร นอกจากนั้นยังได้ วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย และระยะเวลาคืนทุน

ธนพล ศรีวงษา (2552) การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยได้ออกแบบและสร้างกังหันลมขนาดเล็กจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 1.14 เมตร ซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบเหมือนกังหันลมทั่วไป แต่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กลไกการปรับมุมพิชถูกออกแบบและติดตั้งโดยไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโรเตอร์ของกังหันลมทำให้ยังคงสามารถใช้ได้กับช่วงความเร็วลมค่าเดิม แต่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Tous (2008) ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมการปรับมุมพิชของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Wind Turbine) สองวิธี คือ วิธีการควบคุมแบบปิดซึ่งกำหนด

ขอบเขตและอัตราการปรับมุมพิช วิธีที่สอง การควบคุมแบบเปิดซึ่งกำหนดอัตราการปรับแบบสามชั้นตามค่าความผิดพลาดของระบบ คือ ช่วงค่าความผิดพลาดน้อยกำหนดอัตราการปรับมุมพิชเท่ากับศูนย์ และช่วงค่าความผิดพลาดมีค่าเป็นค่าบวกหรือลบมาก กำหนดอัตราการปรับมุมพิชคงที่เป็นบวกหรือลบคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งได้จำลองผลการควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab แสดงผลตอบสนองที่ดีกว่าของหลักการควบคุมแบบสามชั้น

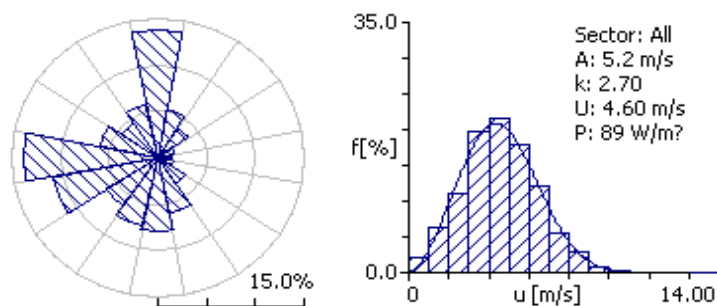
ชโลธร ธรรมแท้ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2552) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การจำลองเชิงตัวเลขของกังหันลมแกนนอนแบบใบปิด ผลการวิจัยกล่าวว่า การจำลองการไหลที่สภาวะคงตัวผ่านกังหันลมแกนนอนที่มีการบิดใบกังหันลมด้วยโปรแกรม 'Fluent' เพื่อทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม การจำลองการไหลทำโดยหาผลเฉลยของสมการที่เขียนแทน กฎการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ด้วยวิธีปริมาตรจำกัดในสามมิติ โดยใช้วิธีการของอัตราเร็วสัมพัทธ์ที่ให้กังหันอยู่กับที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หมุนไป ได้ศึกษาสองกรณีหลักคือ การไหลแบบไม่คิดความหนืด และแบบคิดความหนืด (โดยคำนวณร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนk-epsilon) ได้ใช้วิธีการปรับกริดแบบละเอียดเฉพาะที่ (Local Grid Refinement) และได้ศึกษาความเป็นอิสระของผลลัพธ์ต่อขนาดของกริดด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทดลองกังหันลมของ National Renewable Lab. (USA) พบว่าผลจากการคำนวณสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดีทั้งกรณีที่ไม่คิดความหนืดและคิดความหนืด โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่เกิดการ stall แสดงว่า การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Fluent มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลของลมผ่านกังหันลมแบบแกนนอนได้ ซึ่งจะใช้โปรแกรม Fluent ช่วยในการออกแบบกังหันลมได้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกล (Mechanical Mechanism) ของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสม และกลไกการควบคุมทางไฟฟ้า(Electrical Mechanism) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง จากกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย ดังรูปที่ 1-1 ระบบการทำงานของกังหันลมมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมศาสตร์หลายด้าน ซึ่งจำเป็นต้องทราบทฤษฎีของลม ศักยภาพพลังงานลม หลักอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม ผ่านการจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อการออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกลของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสม และการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองตามลำดับ ดังนี้

3.1 การออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกลของกังหันลมแกนนอนที่เหมาะสม

จากกลไกการขับเคลื่อนทางกล (Mechanical Mechanism) ของกังหันลมแกนนอนเป็นการออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมกับศักยภาพด้านพลังงานลมของแหล่งที่จะไปติดตั้ง ดังนั้นในการออกแบบกังหันลมจึงมีความจำเป็นอย่างมากก่อนที่จะสร้างกังหันลมจึงต้องมีการออกแบบที่ดี โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อช่วยคำนวณหาสมรรถนะของกังหันลมตามคุณลักษณะของกังหันลมตามหลักทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ โดยจะแสดงสมรรถนะของกังหันลมออกมาอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด (C_p) กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ_r) ของกังหันลมที่เหมาะสม



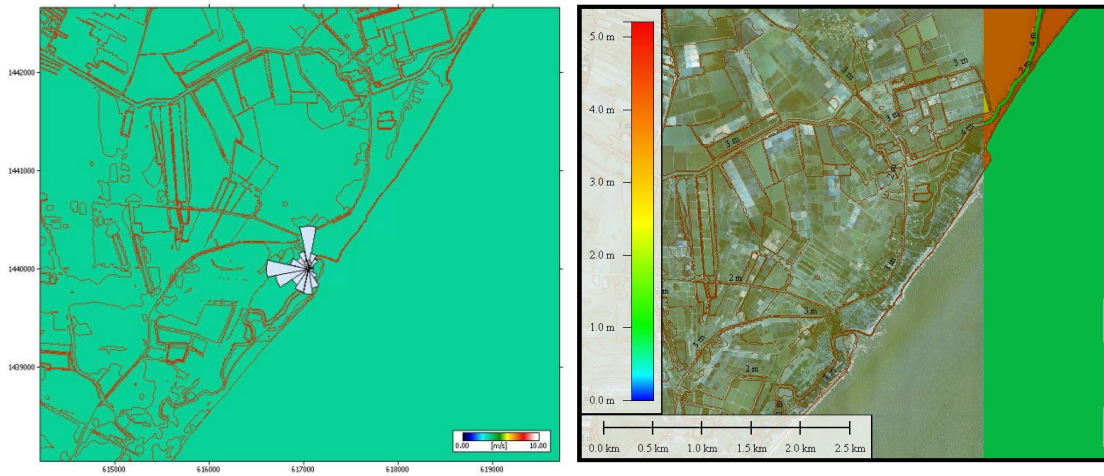
รูปที่ 3-1 การกระจายของความเร็วและทิศทางลมเฉลี่ยรายปี สถานีวัดลมบ้านดอนใน

สำหรับการประเมินศักยภาพพลังงานลมในจังหวัดเพชรบุรีซึ่งเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลอ่าวไทย จากการศึกษาพบว่าบริเวณบ้านดอนโน ต.แหลมผักเบี้ย อ.บ้านแหลม จ.เพชรบุรี มีความเร็วลมเฉลี่ยที่ประมาณ 3.5 เมตรต่อวินาที ได้รับพลังงานที่ 43 วัตต์ต่อตารางเมตรที่ระดับความสูง 10 เมตร จุดที่มีความเร็วลมสูงที่สุดอยู่ที่ละติจูด $100^{\circ}04'41.0''$ N ลองติจูด $13^{\circ}01'42.0''$ E หรือที่พิกัด UTM (617032.980,1440564.430) ดังตารางที่ 3.1 จุดนี้มีความเร็วลมสูงถึง 5 เมตรต่อวินาที ส่วนการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าบริเวณบ้านดอนโน ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย อยู่ที่ 5.1 บาท (ยุทธนา พลอยฉายและคณะ, 2553) จะเห็นว่าพื้นที่จังหวัดเพชรบุรีนั้นเป็นพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ ดังนั้นถ้าหากต้องการนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้น จึงต้องทำการศึกษาและออกแบบใบกังหันลมที่เหมาะสมต่อศักยภาพลมในท้องถิ่นด้วย

ตารางที่ 3.1 ค่าความเร็วลม กำลังลมเฉลี่ย และไวบูลล์พารามิเตอร์ –สถานีบ้านดอนโน

Height	Parameter	0.00 m	0.03 m	0.10 m	0.40 m
10.0 m	Weibull A [m/s]	5.74	3.95	3.43	2.68
	Weibull k	2.73	2.36	2.36	2.33
	Mean speed U [m/s]	5.10	3.50	3.04	2.38
	Power density E [W/m ²]	121	43	28	14
25.0 m	Weibull A [m/s]	6.27	4.72	4.23	3.53
	Weibull k	2.80	2.52	2.50	2.46
	Mean speed U [m/s]	5.59	4.19	3.75	3.13
	Power density E [W/m ²]	156	71	51	30
50.0 m	Weibull A [m/s]	6.73	5.45	4.95	4.25
	Weibull k	2.86	2.77	2.72	2.64
	Mean speed U [m/s]	6.00	4.85	4.40	3.78
	Power density E [W/m ²]	191	103	78	50
100.0 m	Weibull A [m/s]	7.31	6.45	5.88	5.11
	Weibull k	2.79	2.91	2.94	2.94
	Mean speed U [m/s]	6.50	5.76	5.25	4.56
	Power density E [W/m ²]	247	167	126	83
200.0 m	Weibull A [m/s]	8.09	8.04	7.26	6.25
	Weibull k	2.66	2.80	2.84	2.85
	Mean speed U [m/s]	7.19	7.16	6.47	5.57
	Power density E [W/m ²]	344	328	241	153

ที่มา : ยุทธนา พลอยฉาย และ คณะ (2553).



รูปที่ 3-2 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมเฉลี่ยรายปีและแผนที่รวมลมสงบ สถานีวัดลมบ้านดอนใน

การศึกษาหาขนาดและจำนวนของใบพัดกังหันลมที่เหมาะสมสำหรับศักยภาพลมในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ โดยเป็นการศึกษาหาสมรรถนะของกังหันลมหลายใบ (มุมมองจากการพิจารณาความเร็วลม 3-5 เมตรต่อวินาทีให้มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด เพื่อทราบ โมเมนต์บิดและความเร็วรอบของกังหันลม ที่สูงพอเพื่อไปขับเคลื่อนกังหันต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป) โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมและวิเคราะห์สมรรถนะใบกังหันลมแนวแกนนอนแบบหลายใบที่มีคุณลักษณะแตกต่างกันไป

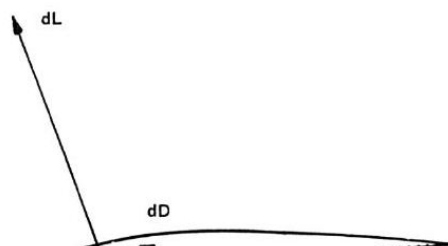
3.1.1) การรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Combination of Momentum Theory and Blade Element Theory)

การออกแบบใบกังหันลมนี้จะใช้การรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Combination of Momentum Theory and Blade Element Theory) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการออกแบบ พิจารณาแผนอากาศที่นำมาออกแบบในครั้งนี้ คือ สังกะสีตัดโค้งที่มีอัตราส่วนความโค้ง 0.07 ซึ่งจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 3-3



$$f/c = 0.07$$

รูปที่ 3-3 ลักษณะของแผนอากาศที่ใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 3-4 แผนภาพความเร็วลมที่เกิดขึ้นบนใบพัดใบหนึ่งของกังหันลมแกนระดับ

การรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบเข้าด้วยกัน เพื่อนำผลที่ได้จากทฤษฎีทั้งสองไปวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลม พิจารณารูปที่ 3-4 จะได้

$$W = V \sin \phi + r\Omega \cos \phi = V(\sin \phi + \lambda_r \cos \phi) \quad (3-1)$$

เมื่อ $\lambda_r =$ อัตราส่วนความเร็วปลายใบที่รัศมีใดๆ; $\frac{\Omega r}{V}$

$$W = \frac{(1-a)V}{\sin \phi} = \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \phi} \quad (3-2)$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V}{(1+a')r\Omega} = \frac{(1+a)}{(1+a')\lambda_r} \quad (3-3)$$

$$\frac{w \cos \phi}{W \sin \phi} = \frac{a}{1-a} \quad (3-4)$$

พิจารณาแรงตามแนวแกนและโมเมนต์บิดจากทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ

$$\text{ทฤษฎีโมเมนตัม : } dT = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr \quad (3-5)$$

$$dQ = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho V\Omega r^2 2\pi r dr \quad (3-6)$$

$$\text{ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ : } dT = \frac{1}{2}Bc\rho W^2(C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)dr \quad (3-7)$$

$$dQ = \frac{1}{2}Bc\rho W^2(C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)rdr \quad (3-8)$$

เมื่อ σ คือ อัตราส่วนโวลิตีตี (Solidity Ratio)

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3-9)$$

แทนค่า V จากสมการที่ (3-1) ลงในสมการที่ (3-4) จะได้

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma C_L \cos \phi}{4 \sin^2 \phi} \quad (3-10)$$

หรือ
$$\frac{w}{W} = \frac{\sigma C_L}{4 \sin \phi} \quad (3-11)$$

จากแผนภาพความเร็วในรูปที่ 3-5 จะได้

$$\Omega r = W \cos \phi - w \sin \phi \quad (3-12)$$

และ
$$V = W \sin \phi + w \cos \phi \quad (3-13)$$

ถ้าให้ $\lambda_r = \frac{\Omega r}{V}$ จะได้
$$\lambda_r = \frac{1 - \left(\frac{w}{W}\right) \tan \phi}{\tan \phi + \frac{w}{W}} \quad (3-14)$$

อัตราส่วนของความเร็วลมสัมพันธ์จากสมการที่(3-11) อยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานที่อากาศบริเวณของกังหันลมจะไม่มีกัมมันต์ และใบกังหันลมแต่ละใบเป็นอิสระต่อกันซึ่งไม่มีผลรบกวนจากใบข้างเคียง แต่ในความเป็นจริงแล้วบริเวณด้านหลังของกังหันลมจะเกิดความแตกต่างของความดันขึ้นเป็นผลให้เกิดการสูญเสียที่บริเวณปลายใบ ดังนั้นในการหาค่าของอัตราส่วนของความเร็วลมสัมพันธ์ให้ถูกต้องนั้นจะต้องคูณสมการที่ (3-11) ด้วยค่า F จะได้

$$\frac{w}{W} = \frac{\sigma C_L}{4F \sin \phi} \quad (3-15)$$

โดย Jensen (1976) ได้พัฒนารูปแบบสมการการสูญเสียปลายใบให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ F ในรูปสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลของรัศมี R และ r ให้อยู่ในรูปค่าคงที่ดังนี้

$$F = \left\{ 1 - \frac{1.386}{B} \sin(\phi/2) \right\}^2 \quad (3-16)$$

จากความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิด

$$C_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho V^2 \pi R^3} \quad (3-17)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของโมเมนต์บิดในรูปของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Torque) ได้ดังนี้

$$\frac{dC_Q}{dx} = 2\sigma \left(\frac{W}{V} \right)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (3-18)$$

แทนค่า W จากสมการ (3-1) ลงในสมการ (3-18) จะได้

$$\frac{dC_Q}{dx} = 2\alpha x^2 (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (3-19)$$

เมื่อ $x =$ เป็นอัตราส่วนของรัศมีที่ตำแหน่งใดๆ; $\frac{r}{R}$

3.1.2) ขั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณนี้แยกออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ส่วนแรกเป็นการคำนวณค่าความยาวคอर्डที่ทำให้กังหันลมสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าตามที่เรากำลังต้องการได้ และส่วนที่สองจะเป็นการนำผลที่ได้จากส่วนแรกมาทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกันเมื่อมุมปะทะใบพัดเปลี่ยนไป และที่จำนวนใบพัดต่างกัน

ส่วนที่ 1 คำนวณหาค่าความยาวคอर्डที่ความเร็วลมต่างๆ

1. กำหนดค่า Power ที่ต้องการจากกังหันลม ค่าความเร็วลมและจำนวนใบกังหันลม เพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์บิดที่กังหันลมต้องการ
2. นำค่าโมเมนต์บิดที่ได้คำนวณหาค่าพื้นที่รับลม และค่าความยาวคอर्डของกังหันลม แต่ละใบ

ส่วนที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดของกังหันลม

1. กำหนดค่าความยาวคอर्ड ค่ามุมปะทะ ที่แต่ละจำนวนใบพัดต่างกัน หรือกำหนดค่าจำนวนใบมีค่ามุมปะทะต่างกัน เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน
2. กำหนด $0.9 < r < 2.1$ เมตร โดยที่แต่ละ r จะมีค่าความยาวคอर्डที่ต่างกัน
3. คำนวณค่า $\sigma, F, \frac{w}{W}, \lambda_r, \frac{dC_Q}{dx}$ ที่ทุกๆ r
4. นำค่า $\frac{dC_Q}{dx}$ มาทำการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ค่า C_Q
5. คำนวณค่า C_p จากค่า C_Q ด้วยสมการที่ (3.7)

กำหนดให้ Power ที่ต้องการเท่ากับ 2.2 kW หรือ Generator ที่มีกำลัง 3 แรงม้า แต่กังหันลมที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้ Torque เป็นหลัก จึงได้ว่า

$$Q = C_Q \frac{1}{2} \rho V^2 A R \quad (3-20)$$

จากนั้น นำค่า Torque ที่ได้จากสมการ (3-20) แทนลงในสมการที่ (3-17) จะทำให้เราได้ค่าพื้นที่ของใบกังหันลมที่ผลิต Torque ได้เพียงพอที่จะไปปั่น Generator ขนาด 3 แรงม้า จะได้

$$A = \frac{2Q}{C_Q \rho V^2 R} \quad (3-21)$$

เมื่อทราบค่า A จะทำให้เราสามารถระบุค่า C ที่กังหันลมต้องการได้ ตามสมการการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมู จะได้

$$A = \frac{1}{2} \times (C + 1.436C) \times L \times B \quad (3-22)$$

ค่าความยาวคอर्डที่ได้จากสมการ (3-22) นั้นคือค่าความยาวคอर्डของใบกังหันด้านแคบ ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้ ไม่ได้กำหนดให้ค่าความยาวคอर्डเสมอกันตลอดหน้าตัด หากแต่ที่ปลายใบพัดนั้นได้มีความกว้างมากกว่าทางด้านโคนใบด้วยมุม 29 องศา ซึ่งเป็นขนาดมุมที่ใช้ติดตั้งใบพัด แต่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาค่า C จึงได้คิดเป็นอัตราส่วนออกมาคือ 1.436

จากสมการที่ (3-22) ทำให้เราทราบค่า C แล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นจำเพาะ (Solidity) ได้ จากสมการที่ (3-9) นอกจากนี้ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมโดยตรงอีกตัวคือค่าความสูญเสียปลายใบ

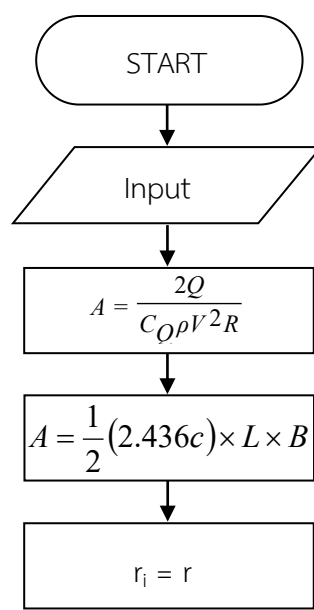
$$F = 1 - \frac{1.386}{B} \sin^2(\phi/2) \quad (3-23)$$

การนำค่าสัมประสิทธิ์กำลังเปรียบเทียบกับนั้น จำเป็นต้องใช้ตัวแปรไร้มิติ ซึ่งในที่นี้ใช้อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ซึ่งได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V}, \quad \lambda = \lambda_r x \quad (3-24)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ สัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) ที่สามารถหาได้จากสมการ

$$C_P = C_Q \times \lambda \quad (3-25)$$



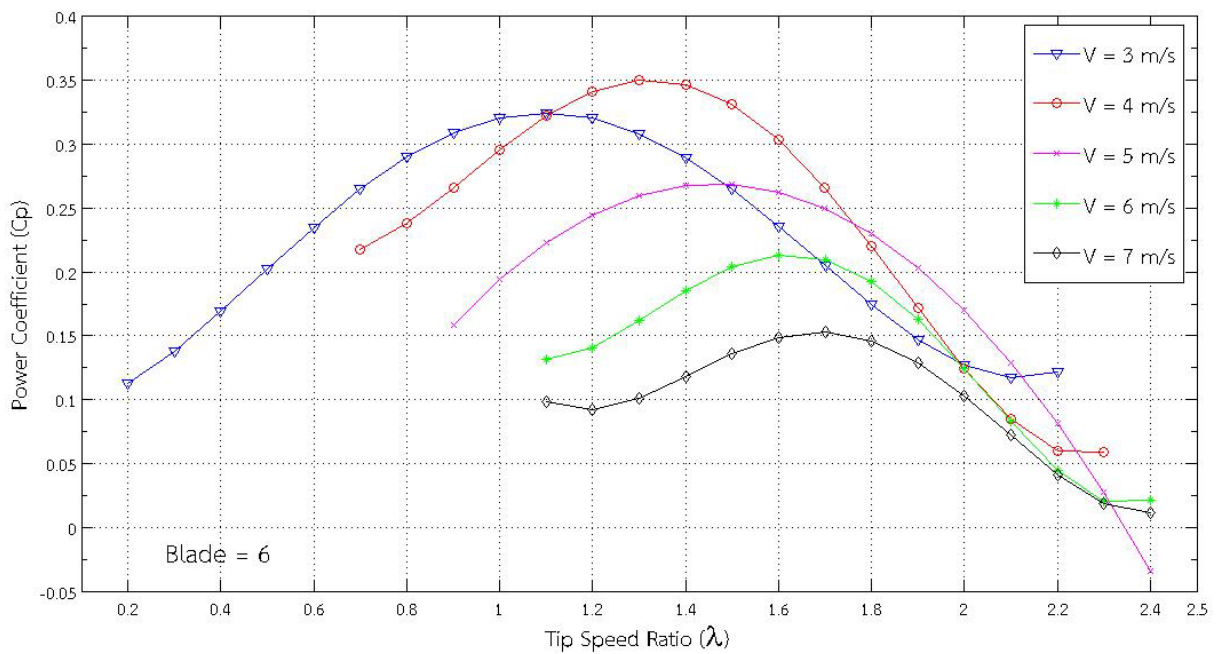
รูปที่ 3-5 Flowchart แสดงขั้นตอนการคำนวณ

ในการออกแบบตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ จำนวนใบ ค่าความยาวคอร์ดด้านแคบ ค่าความยาวคอร์ดด้านกว้าง ที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม โดยเทียบกับตัวแปรคือ อัตราส่วนความเร็วมลายใบ โดยที่ศึกษาที่ค่าความเร็วม 3 – 7 m/s จะได้ออกมาเป็นดังตารางและกราฟดังต่อไปนี้

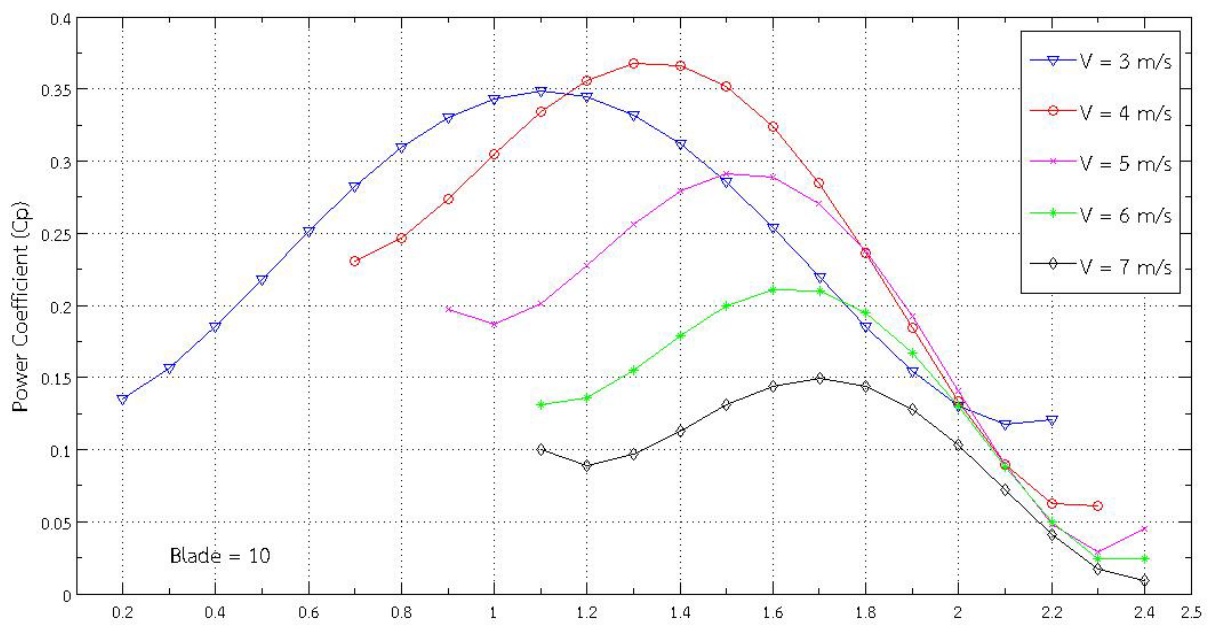
ตารางที่ 3-2 ค่าความยาวคอร์ดที่ความเร็วม 3 – 7 เมตร/วินาที ที่ได้จากการคำนวณ

ความเร็วม	จำนวนใบ(Blade)	ค่าความยาวคอร์ดด้านแคบ (m)	ค่าความยาวคอร์ดด้านกว้าง (m)
3 m/s	6	1.8298	2.6276
	10	1.0979	1.5766
	15	0.7319	1.0511
	20	0.5490	0.7883
	24	0.4575	0.6569
4 m/s	6	0.7720	1.1085
	10	0.4632	0.6651
	15	0.3088	0.4434
	20	0.2316	0.3326
	24	0.1930	0.2771
5 m/s	6	0.3952	0.5676
	10	0.2371	0.3405
	15	0.1581	0.2270
	20	0.1186	0.1703
	24	0.0988	0.1419
6 m/s	6	0.2287	0.3285
	10	0.1372	0.1971
	15	0.0915	0.1314
	20	0.0686	0.0985
	24	0.0572	0.0821
7 m/s	6	0.1440	0.2068
	10	0.0864	0.1241

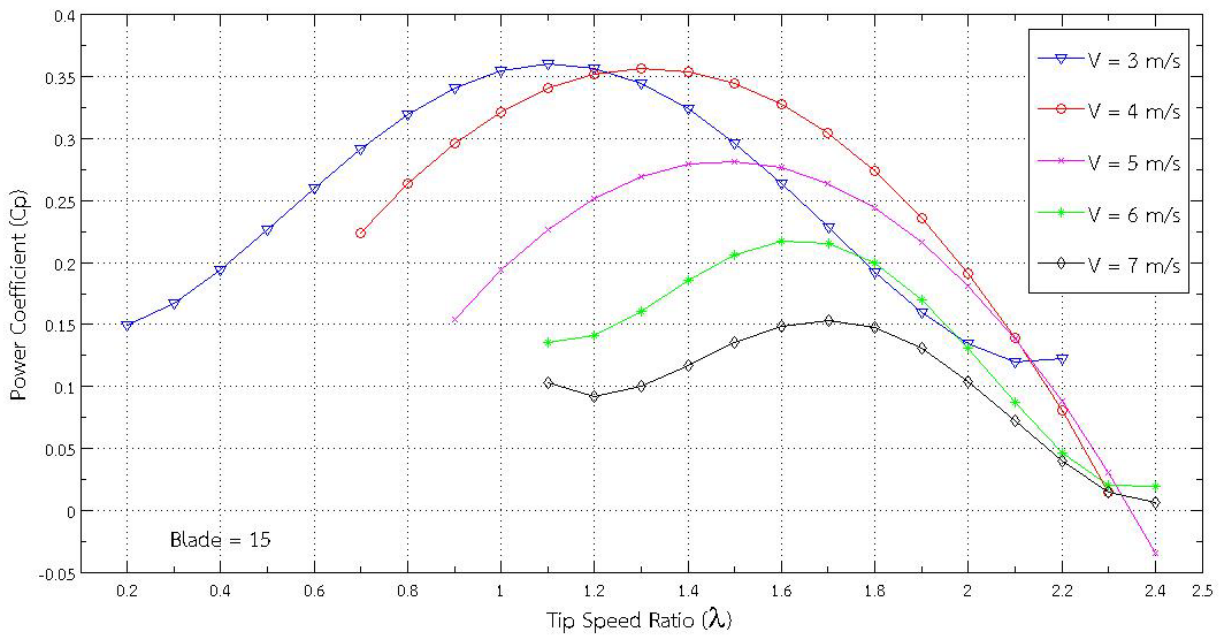
	15	0.0576	0.0827
	20	0.0432	0.0621
	24	0.0360	0.0517



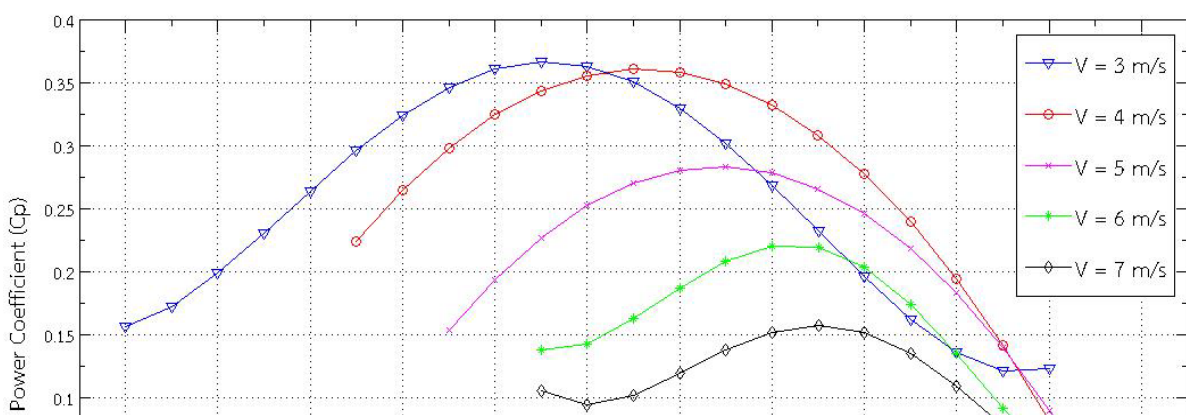
รูปที่ 3-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 6 ใบ



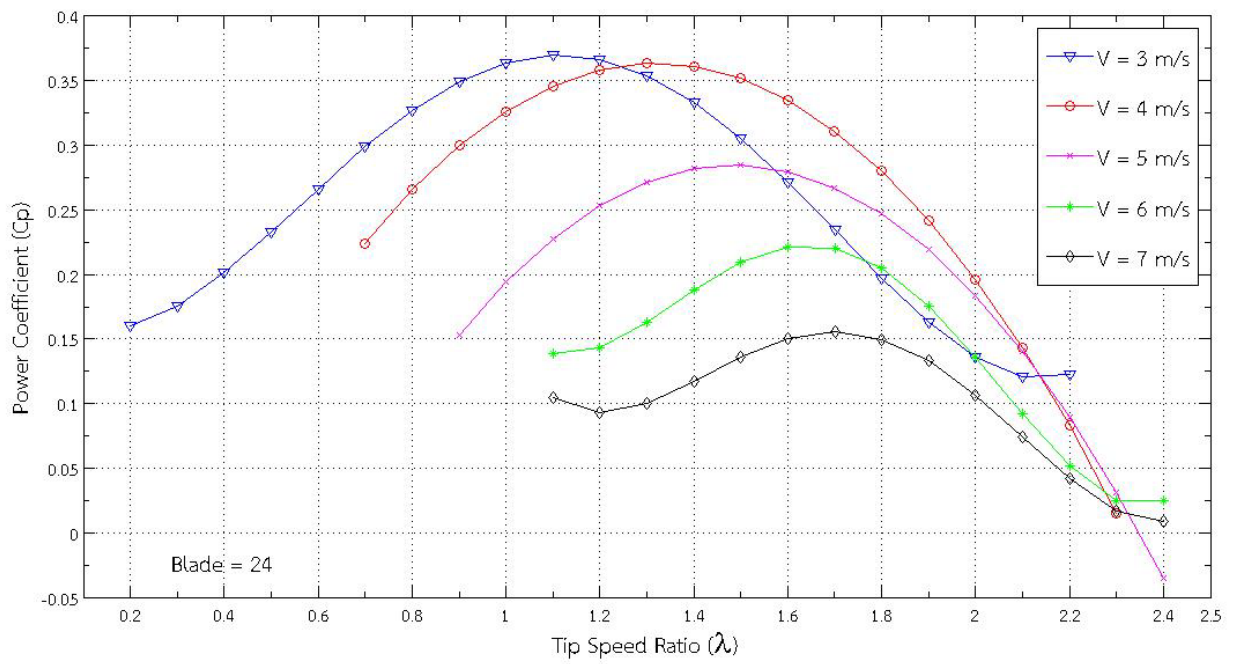
รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 10 ใบ



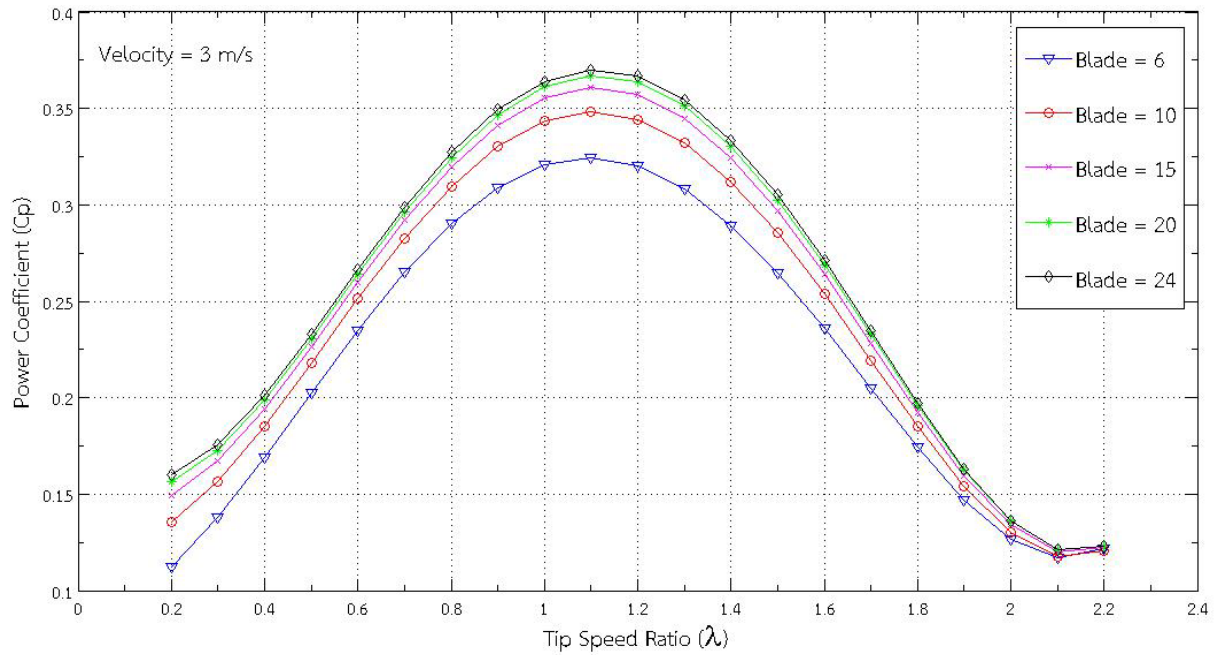
รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 15 ใบ



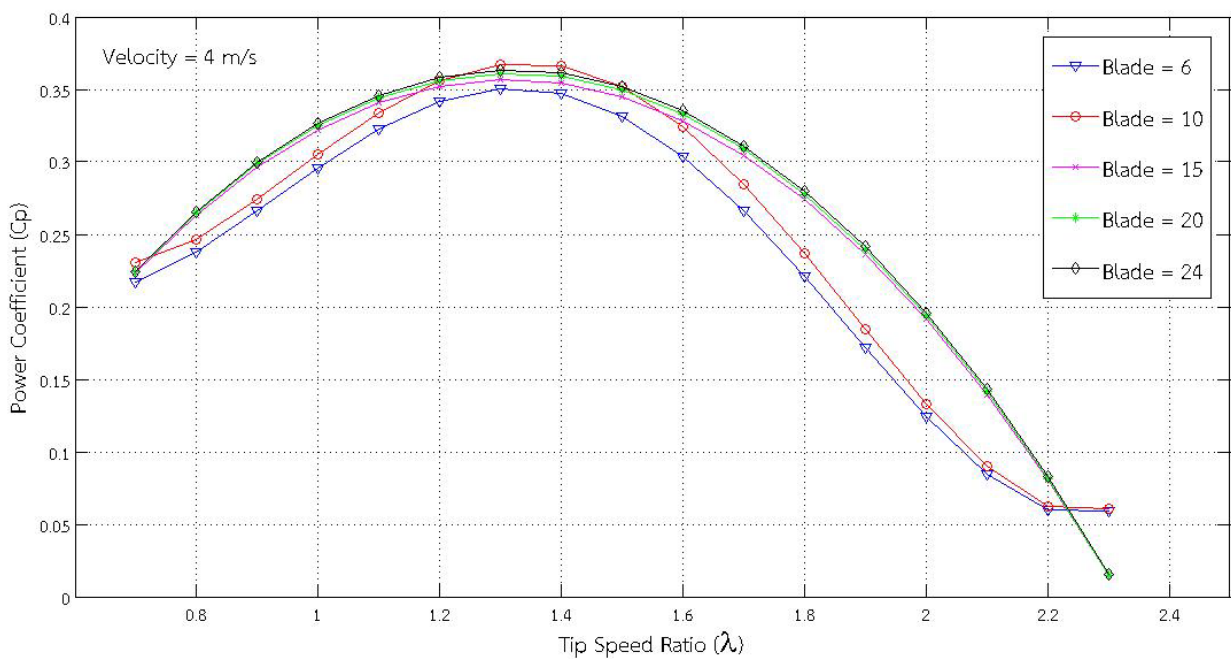
รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
 ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 20 ใบ



รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 24 ใบ



รูปที่ 3-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่ความเร็วลม 3 เมตร/วินาที



รูปที่ 3-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)
ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

จากตารางที่ 3-2 แสดงค่าความยาวคอर्डที่ความเร็วลม 3-7 m/s ที่ได้จากการคำนวณความสามารถของกังหันลมที่สร้างทอร์คเพื่อขับเพลลาต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าได้

จากรูปที่ 3-6 ถึง 3-10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ต่อค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) ที่จำนวน 6 – 24 ใบ จะเห็นว่า ที่จำนวนใบเท่ากัน เมื่อความเร็วลมต่างกัน ผลของค่าประสิทธิภาพกังหันลมจะมีค่าสูงที่ความเร็วลมในช่วง 3-4 เมตร/วินาที โดยกังหันลมจำนวน 10 ใบ ที่ความเร็ว 4 เมตร/วินาที มีค่าสูงสุดแต่เนื่องจากการออกแบบกังหันลมหลายใบมีจุดประสงค์ให้สามารถทำงานในช่วงความเร็วลม 3 และ 4 เมตร/วินาที ซึ่งหมายถึงกังหันลมต้องมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วทั้งสองจึงเลือกใช้กังหันลมจำนวน 24 ใบที่อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ) ประมาณ 1.1-1.3 ที่ประสิทธิภาพของกังหันลม (C_p) 0.3669-0.37

และจากรูปที่ 3-11 ถึง 3-12 นั้นจะแสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพของกังหันลมที่มีความเร็วลมเท่ากันซึ่งเลือกนำมาแสดงในช่วงทำงาน ระหว่างความเร็ว 3 และ 4 เมตร/วินาที ที่จำนวนใบ 6 – 24 ใบ สังเกตว่าที่จำนวนใบ 24 ใบให้ผลของประสิทธิภาพดีในช่วงทั้งสองความเร็ว แต่เมื่อความเร็ว 4 เมตร/วินาทีที่กังหันลมจำนวน 10 ใบให้ค่าที่ดีที่สุด นั้นแสดงให้เห็นว่า จำนวนใบกังหันลมที่มีจำนวนใบที่สูงขึ้น มิได้ให้ผลของประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเสมอ แต่ควรเลือกตามลักษณะของการใช้งานตามความเร็วลมที่ออกแบบไว้

ผลจากการออกแบบนำมาสร้างสมการโพลิโนเมียลเพื่อนำไปแทนค่าในแบบจำลองกังหันในหัวข้อถัดไป ได้สมการค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สำหรับความเร็ว 3-4 m/s ตามลำดับ ของกังหันลมแบบหลายใบ จำนวน 24 ใบ ดังสมการที่ (3-26)

$$C_p = 0.2329 \cdot \lambda^4 - 1.0571 \cdot \lambda^3 + 1.3351 \cdot \lambda^2 - 0.3268 \cdot \lambda + 0.18 \quad (3-26)$$

$$C_p = 0.9563 \cdot \lambda - 0.2676 - 0.3623 \cdot \lambda^2 \quad (3-27)$$

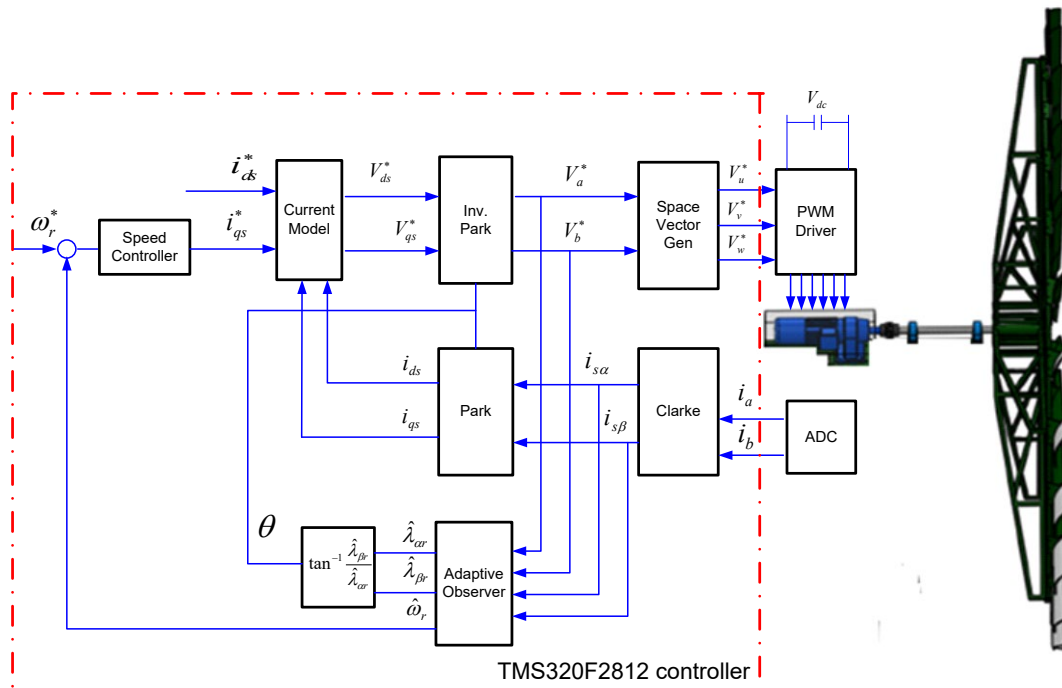
เมื่อได้แบบจำลองกังหันลมแบบหลายใบที่เหมาะสมแล้วนำไปสู่การจำลองความเร็วรอบของกังหันลม โดยใช้แบบจำลองกลไกการควบคุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเองในหัวข้อ 3.2 ต่อไป

จากการศึกษาหาสมรรถนะของกังหันลมที่มีใบพัดเป็นลักษณะแผ่นโค้ง โดยมีอัตราส่วนความโค้งเท่ากับ 0.07 และให้ค่ากำลังงาน 2.2 kW พบว่า

1. จากการศึกษาและออกแบบด้วยทฤษฎีเบลตอิลิเมนต์โมเมนต์พบว่าเมื่อกังหันลมมีจำนวนใบต่างกัน กังหันลมจะมีค่าประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยที่เมื่อศึกษาที่ความเร็วลมเท่ากันแล้วจำนวนใบที่ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดคือ 24 ใบ
2. ศึกษาที่ค่าจำนวนใบเท่ากันแล้ว ความเร็วลมที่ให้ประสิทธิภาพของกังหันลมสูงสุดคือที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที ซึ่งอาจมีผลมาจากกำลังงานที่ต้องการ ซึ่งได้กำหนดลงในโปรแกรมที่ใช้คำนวณ จึงทำให้เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น แรงบิดที่ต้องการย่อมลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย
3. ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้จากการคำนวณคือ 0.3669-0.37 ที่อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบเท่ากับ 1.1-1.3 โดยเกิดที่ความเร็วลม 3-4 เมตร/วินาที จำนวนใบกังหันลมคือ 24 ใบและมีค่าความยาวคอร์ดด้านกว้าง 0.2771 เมตร ความยาวคอร์ดด้านแคบ 0.1930 เมตร
4. ค่าความยาวคอร์ดที่คำนวณได้ที่ความเร็วลมและจำนวนใบที่แตกต่างกันนั้น บางกรณีไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง เช่น ที่ความเร็วลม 3 เมตร/วินาที จำนวนใบ 24 ใบ ที่คำนวณค่าความยาวคอร์ดด้านกว้างได้ 0.6569 เมตร และด้านแคบได้ 0.4575 เมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าเป็นค่าความยาวคอร์ดที่ไม่สามารถสร้างได้จริง เป็นต้น

3.2 การออกแบบกลไกควบคุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง

กลไกควบคุมทางไฟฟ้า (Electrical Mechanism) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง เป็นการออกแบบกลไกการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง ซึ่งนำมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล โดยการสร้างกำลังรีแอคทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีความจำเป็นจะต้องทราบคุณลักษณะการทำงานทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะพลวัตด้วยวงจรมูลบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส และวิเคราะห์พฤติกรรมที่ส่งผลต่อการควบคุมความเร็วรอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสัมพันธ์กับต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนตามแบบจำลองกึ่งหนวมหลายใบ จึงได้นำแบบจำลองการปรับตัวได้ (Adaptive control) โดยพิจารณาถึงความเร็วจากการประมาณติดตามความเร็วรอบที่เหมาะสมในสภาวะการทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหมือนกับแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงดังรูปที่ 3-13 ให้สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกึ่งหนวม โดยใช้การจำลองการควบคุมกึ่งหนวมด้วยหลักอากาศพลศาสตร์ของกึ่งหนวมจริงซึ่งสามารถทำได้ยากเนื่องจากความเร็วลมที่พัดผ่านกึ่งหนวมนั้น มีความเร็วไม่คงที่ทำให้ยากต่อการคำนวณ



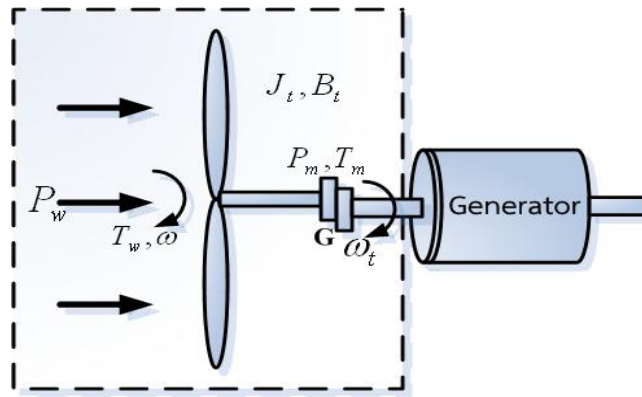
รูปที่ 3-13 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองสำหรับกึ่งหนวมหลายใบ

แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความเร็วลมที่นำมาคิดเป็นความเร็วลมที่คงที่ชั่วขณะจึงสามารถนำมาคิดตามหลักทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกึ่งหนวมได้ โดยนำผลจากการออกแบบกึ่งหนวมแนวแกนนอนแบบหลายใบเชิงทฤษฎีจากหัวข้อที่ 3.1 ได้สรุปเลือกแบบจำลองกึ่งหนวมจำนวน 24

ใบ ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้จากการคำนวณคือ 0.3669-0.37 ที่อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบเท่ากับ 1.1-1.3 โดยเกิดที่ความเร็วลม 3-4 เมตร/วินาที สมรรถนะของกังหันลมที่มีใบพัดเป็นลักษณะแผ่นโค้ง โดยมีอัตราส่วนความโค้งเท่ากับ 0.07 และให้ค่ากำลังงาน 2.2 kW นำมาสร้างแบบจำลองการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ่นตัวเองดังนี้คือ

3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม

จากหลักการของกังหันลมที่มีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานกลแล้วจึงเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม

จากรูปกำหนดให้อัตราทดของเกียร์ $G = 1$ เพราะฉะนั้นความเร็วรอบที่ $\omega_t = \omega$ เนื่องจากค่า C_p ของกังหันลมขึ้นอยู่กับค่าความเร็วลม (v) ความเร็วรอบ (ω) และมุมพิช (β) มีค่าเท่ากับ 29 องศา ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วขอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการ $\lambda = \frac{\omega R}{v}$ จะได้พลังงานของกังหันลม (Wind Turbine Power) ที่สามารถสกัดได้หาได้จากสมการ

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda) \quad (3-27)$$

สำหรับแรงบิดของกังหันลม T_m เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก ω จะได้ $T_m = \frac{P_m}{\omega}$ เพราะฉะนั้น T_m จะได้

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A C_p \frac{v^3}{\omega} \quad (3-28)$$

แทนค่า เมื่อ $A =$ พื้นที่หน้าตัดของกังหันลม $\omega = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้ $T_m = \frac{1}{2} \rho A R \frac{C_p}{\lambda} v^2 = \frac{1}{2} \rho A R C_Q v^2$
โดยที่ $C_Q = \frac{C_p}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ทอร์ก สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำค่า C_p จากการออกแบบตาม
หัวข้อ 3.1 มาใช้ ผลจากการออกแบบนำมาสร้างสมการโพลีโนเมียลเพื่อนำไปแทนค่าในแบบจำลอง
กังหัน ได้สมการค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สำหรับความเร็ว 3-4 m/s ตามลำดับ ของกังหันลมแบบหลาย
ใบ จำนวน 24 ใบ ดังสมการที่ (3-29)

$$C_p = 0.2329 \cdot \lambda^4 - 1.0571 \cdot \lambda^3 + 1.3351 \cdot \lambda^2 - 0.3268 \cdot \lambda + 0.18 \quad (3-29)$$

$$C_p = 0.9563 \cdot \lambda - 0.2676 - 0.3623 \cdot \lambda^2 \quad (3-30)$$

เพราะฉะนั้นค่าทอร์กของกังหันลม จะได้

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A [0.2329 \cdot \lambda^4 - 1.0571 \cdot \lambda^3 + 1.3351 \cdot \lambda^2 - 0.3268 \cdot \lambda + 0.18] \frac{v^3}{\omega} \quad (3-31)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A [0.9563 \cdot \lambda - 0.2676 - 0.3623 \cdot \lambda^2] \frac{v^3}{\omega} \quad (3-32)$$

จากรูปที่ 3-14 เราสามารถเขียนสมการไดนามิกของกังหันลมได้เป็น

$$J_t \omega_t = T_w - T_m \quad (3-33)$$

ตารางที่ 3-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของกังหันลมกับความเร็วลม 3 m/s

ความเร็วลม (V, m/s)	Tip Speed Ratio (λ)	พื้นที่รับแรงลม (A, m ²)	ความเร็ว เชิงมุม (rpm)	ความเร็วรอบเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า (rpm)	ความเร็วรอบ กังหันลม	ทอร์กของกังหัน ลม (Watts)	สัมประสิทธิ์กำลัง (CP)	สัมประสิทธิ์ แรงบิด(CQ)
3	0.7	16.04736	1	532.6598	9.549297	79.29844	0.298807	0.419723
	0.8	16.04736	1.142857143	608.754	10.91348	75.98754	0.327236	0.395228
	0.9	16.04736	1.285714286	684.8483	12.27767	72.15315	0.349564	0.372605
	1	16.04736	1.428571429	760.9425	13.64185	67.6568	0.3642	0.3511
	1.1	16.04736	1.571428571	837.0368	15.00604	62.50475	0.370113	0.329653
	1.2	16.04736	1.714285714	913.131	16.37022	56.78772	0.366829	0.307041
	1.3	16.04736	1.857142857	989.2253	17.73441	50.64838	0.354436	0.282053
	1.4	16.04736	2	1065.32	19.09859	44.26282	0.333577	0.253693
	1.5	16.04736	2.142857143	1141.414	20.46278	37.82938	0.305456	0.221423

1.6	16.04736	2.285714286	1217.508	21.82696	31.56173	0.271837	0.185423
1.7	16.04736	2.428571429	1293.602	23.19115	25.68433	0.235042	0.146889
1.8	16.04736	2.571428571	1369.697	24.55533	20.42945	0.197951	0.108364
1.9	16.04736	2.714285714	1445.791	25.91952	16.03513	0.164004	0.074089
2	16.04736	2.857142857	1521.885	27.2837	12.7437	0.1372	0.0504
2.1	16.04736	3	1597.979	28.64789	10.80079	0.122096	0.046139
2.2	16.04736	3.142857143	1674.074	30.01207	10.45455	0.12381	0.073107
2.3	16.04736	3.285714286	1750.168	31.37626	11.95515	0.148017	0.146544

ตารางที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของกังหันลมกับความเร็วลม 4 m/s

ความเร็วลม (V, m/s)	Tip Speed Ratio (λ)	พื้นที่รับแรงลม (A, m ²)	ความเร็วเชิงมุม (rpm)	ความเร็วรอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (rpm)	ความเร็วรอบกังหันลม	ทอร์กของกังหันลม (Watts)	สัมประสิทธิ์กำลัง (CP)	สัมประสิทธิ์แรงบิด (CCQ)
4	0.7	6.76944	1.333333333	710.213018	12.73239545	44.63714716	0.224283	0.377359
	0.8	6.76944	1.523809524	811.6720205	14.55130908	46.24703236	0.265568	0.317041
	0.9	6.76944	1.714285714	913.1310231	16.37022272	46.37752415	0.299607	0.30646
	1	6.76944	1.904761905	1014.590026	18.18913635	45.47244055	0.3264	0.312
	1.1	6.76944	2.095238095	1116.049028	20.00804999	43.8142112	0.345947	0.315457
	1.2	6.76944	2.285714286	1217.508031	21.82696362	41.59112255	0.358248	0.309259
	1.3	6.76944	2.476190476	1318.967033	23.64587726	38.93352674	0.363303	0.292471
	1.4	6.76944	2.666666667	1420.426036	25.46479089	35.93453245	0.361112	0.267583
	1.5	6.76944	2.857142857	1521.885038	27.28370453	32.66241938	0.351675	0.238094
	1.6	6.76944	3.047619048	1623.344041	29.10261816	29.16839729	0.334992	0.206876
	1.7	6.76944	3.238095238	1724.803044	30.9215318	25.49162661	0.311063	0.17533
	1.8	6.76944	3.428571429	1826.262046	32.74044543	21.66256543	0.279888	0.143332
1.9	6.76944	3.619047619	1927.721049	34.55935907	17.70525961	0.241467	0.109957	

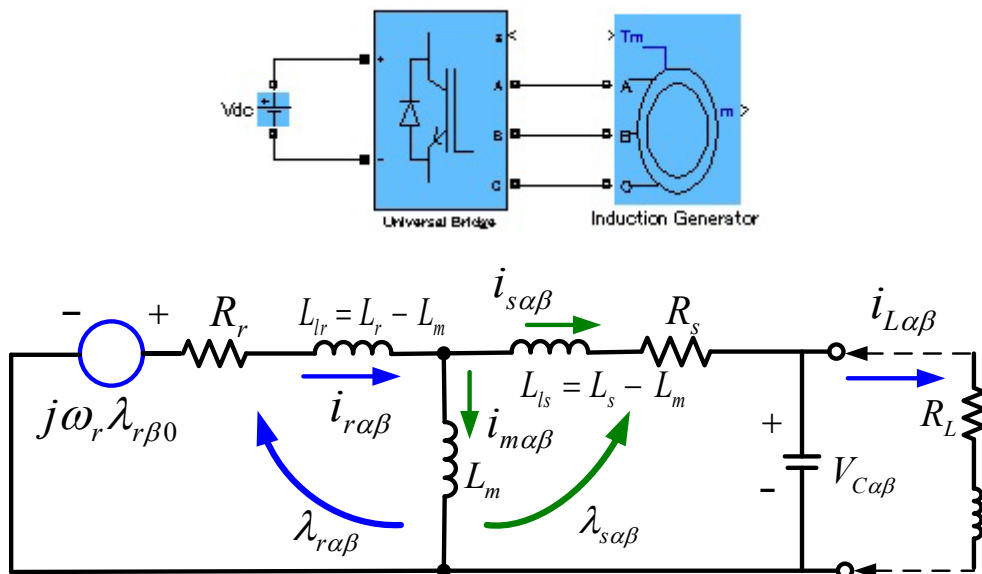
	2	6.76944	3.80952381	2029.180051	36.3782727	13.63894586	0.1958	0.075
	2.1	6.76944	4	2130.639054	38.19718634	9.479196738	0.142887	0.041285
	2.2	6.76944	4.19047619	2232.098056	40.01609997	5.238753428	0.082728	0.017752
	2.3	6.76944	4.380952381	2333.557059	41.83501361	0.92814126	0.015323	0.023344

ตารางที่ 3-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของกังหันลมกับความเร็วลม 3-4 m/s

ความเร็วลม (V, m/s)	Tip Speed Ratio (λ)	พื้นที่รับแรงลม (A, m ²)	ความเร็วเชิงมุม (rpm)	ความเร็วรอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (rpm)	ความเร็วรอบกังหันลม	ทอร์กของกังหันลม	สัมประสิทธิ์กำลัง (CP)	สัมประสิทธิ์แรงบิด(CQ)
3	1.1	16.04736	1.571428571	837.0368	15.00604	62.50475	0.370113	0.329653
4	1.3	6.76944	2.476190476	1318.967033	23.64587726	38.93352674	0.363303	0.292471

3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง

แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ ($\alpha - \beta$ axis) โดยมีแรงดันสเตเตอร์ (v_s) เป็นสัญญาณเข้า กระแสสเตเตอร์ (i_s) และโรเตอร์ฟลักซ์ (λ_r) เป็นตัวแปรสถานะ



รูปที่ 3-15 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส

จากรูปที่ 3-15 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส โดยนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (3-34)$$

โดยที่ $A_{11} = -\frac{1}{\sigma L_s} \left(R_s + \frac{R_r M^2}{L_r^2} \right) \cdot I$, $A_{12} = \left(\frac{R_r}{L_r \varepsilon} \right) \cdot I - \frac{\omega_m}{\varepsilon} \cdot J$, $A_{21} = \left(\frac{MR}{L_r} \right) \cdot I$

$$A_{22} = -\varepsilon A_{12}, \quad B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} \cdot I, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}, \quad \varepsilon = \frac{\sigma L_s L_r}{M}, \quad i_s = [i_{\alpha s} \quad i_{\beta s}]^T$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

v_s : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์บนแกน ($\alpha - \beta$ axis)

i_s : สเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์บนแกน ($\alpha - \beta$ axis)

λ_r : สเปซเวกเตอร์ของโรเตอร์ฟลักซ์บนแกน ($\alpha - \beta$ axis)

R_s, R_r : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

L_s, L_r : ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

M : ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

σ : สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม (Leakage coefficient)

ω_n : ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed)

P : จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก (Number of pole pairs)

เนื่องจากการควบคุมเวกเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ การแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ จะทำให้สะดวกต่อการควบคุม เราสามารถแสดงแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ ($d - q$ axis)

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{R_r M^2}{L_r^2} (i_{sd} - i_{mR}) - \sigma L_s \omega i_{sq} \quad (3-35)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{M^2}{L_r} \omega (i_{sd} - i_{mR}) + L_s \omega i_{sd} \quad (3-36)$$

$$\frac{di_{mR}}{dt} = \frac{R_r}{L_r} (i_{sd} - i_{mR}) \quad (3-37)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega = \omega_m + \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{i_{sq}}{i_{mR}} \right) = \omega_m + \omega_s \quad (3-38)$$

โดยที่ $[\cdot]_d, [\cdot]_q$ แสดงองค์ประกอบของเวกเตอร์ในแกน d และแกน q ตามลำดับ

i_{mR} : กระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์

ω : ความถี่โรเตอร์ฟลักซ์

ω_m : ความเร็วโรเตอร์ทางไฟฟ้า

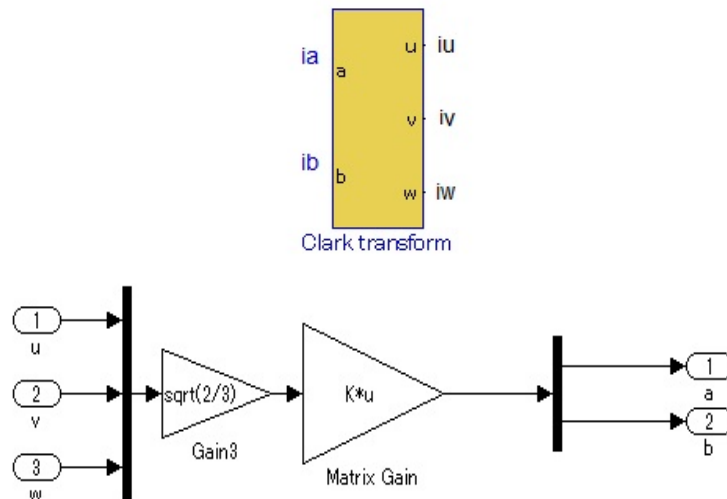
ω_s : ความถี่สลิป

ρ : มุมโรเตอร์ฟลักซ์

3.2.3 การควบคุมแบบเวกเตอร์

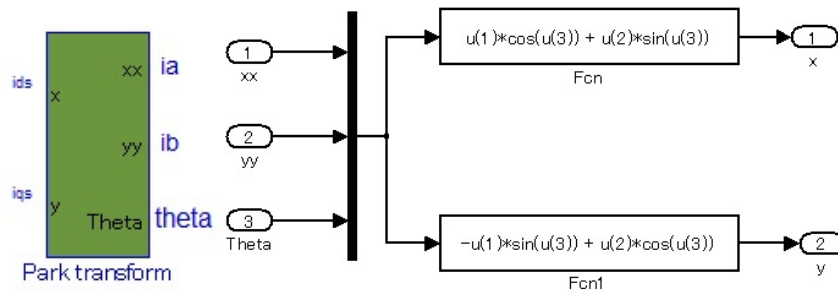
(1) การแปลง 3 เฟสเป็น 2 เฟส (Clarke's Transformation)

เป็นการลดตัวแปรของการคำนวณในแบบสเปซเวกเตอร์ โดยแปลงเวกเตอร์กระแส 3 เฟส คือ I_a, I_b และ I_c ของแกนสเตเตอร์อ้างอิง (Stationary Reference Frame) ให้เป็นเวกเตอร์กระแส 2 เฟส ในแกน I_d (Direct axis) และในแกน I_q (Quadrature axis) ของแกนสเตเตอร์อ้างอิง



รูปที่ 3-16 แสดงการแปลง 3 เฟสเป็น 2 เฟส (Clarke's Transformation)

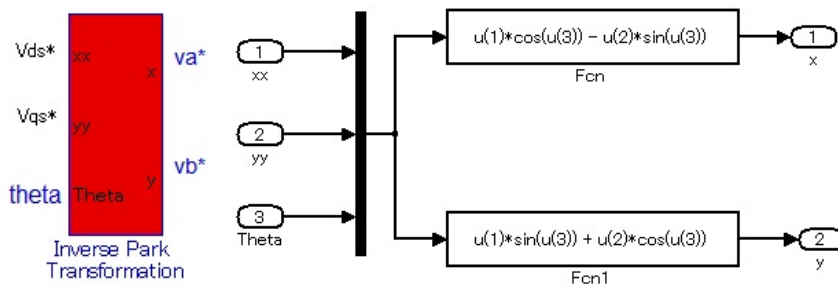
(2) การแปลงแกนอ้างอิงสเตเตอร์ไปบนแกนอ้างอิงหมุน (Park's Transformation)



รูปที่ 3-17 การแปลงแกนจาก 2 เป็น 3 เฟส(Park's Transformation)

(3) Inverse Transformation 2/3

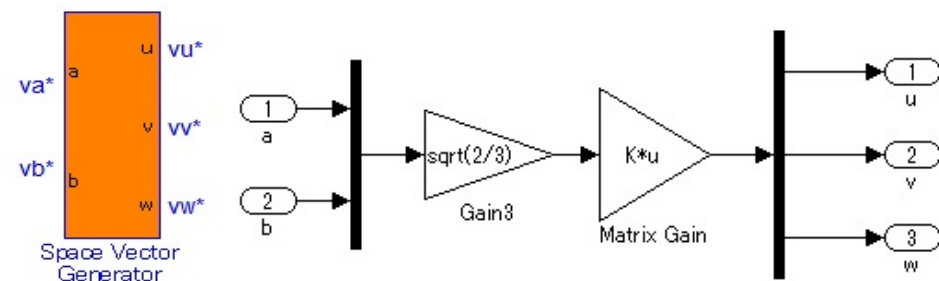
การแปลงแกนจากแกนอ้างอิงสเตเตอร์อยู่ในแกนสามเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 การแปลงแกนจากแกนอ้างอิงสเตเตอร์อยู่ในแกนสามเฟส

(4) สเปซเวกเตอร์พัลส์วิทมอดูเลชั่น (Space Vector Pulse Width Modulation: SVPWM)

จาก 2/3 Transformation จะได้แรงดัน V_U^*, V_V^*, V_W^* ซึ่งเป็นค่าสั่งที่จะไปจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อทำการปรับค่าความแรงดันตามค่าสั่ง ซึ่งจะนำค่าสั่งแรงดันนี้ไปควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันจาก Voltage Source ที่เป็นแบบ SVPWM ดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-19 แสดงการสร้างสเปซเวกเตอร์พัลส์วิทมอดูเลชั่น

การควบคุมเวกเตอร์จะอาศัยสมการด้านโรเตอร์ในการประมาณค่าโรเตอร์ฟลักซ์หรือกระแสสนาม โรเตอร์ฟลักซ์และควบคุมกระแสสเตเตอร์ตามตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์ โดยการควบคุมขนาดของโรเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสในแกน d และขนาดของแรงบิดผ่านกระแสในแกน q

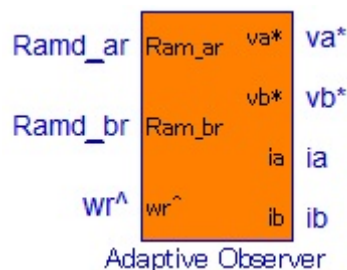
ดังนั้นมุมโรเตอร์ฟลักซ์จึงเป็นค่าอ้างอิงที่สำคัญในการควบคุมแบบเวกเตอร์และสมรรถนะของการควบคุมเวกเตอร์ ขึ้นอยู่กับผลตอบสนองของการควบคุมกระแส โดยนิยามสัญลักษณ์ “ $\hat{\cdot}$ ” หมายถึง ค่าประมาณจากสมการด้านโรเตอร์ของตัวควบคุมเวกเตอร์ สามารถแสดงสมการด้านโรเตอร์ในตัวควบคุมเวกเตอร์ได้ใหม่ ดังนี้

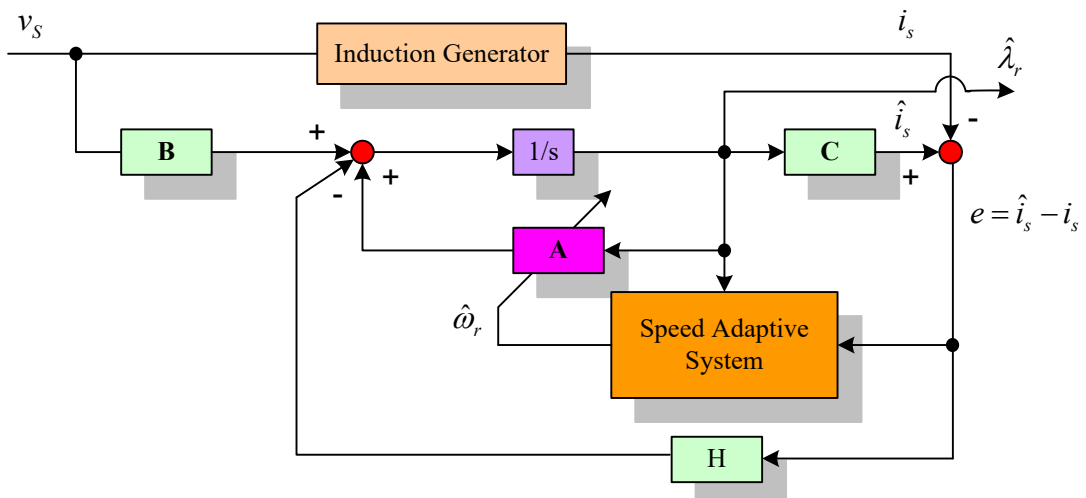
$$\frac{d\hat{i}_{mR}}{dt} = \frac{R_r}{L_r} (i_{sd} - \hat{i}_{mR}) \quad (3-39)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega = \omega_m + \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{i_{sq}}{\hat{i}_{mR}} \right) = \omega_m + \hat{\omega}_s \quad (3-40)$$

3.2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว

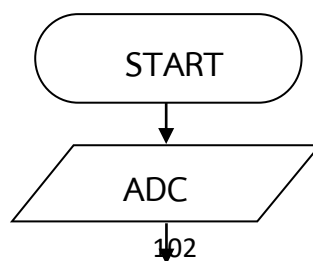
ใช้วิธี MRAS ซึ่งมีหลักการคือ จะใช้แบบจำลองของมอเตอร์จริงเป็นแบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) และตัวควบคุมเวกเตอร์เป็นแบบจำลองปรับตัว (Adjusted Model) ค่าความเร็วโรเตอร์สามารถประมาณได้จากสัญญาณค่าผิดพลาดของสัญญาณออกจากแบบจำลองทั้งสอง และถูกนำมาใช้กลับในการปรับแบบจำลองในแบบปรับจำลองปรับตัว ให้มีทิศทางที่จะทำให้สัญญาณค่าผิดพลาดเป็นศูนย์

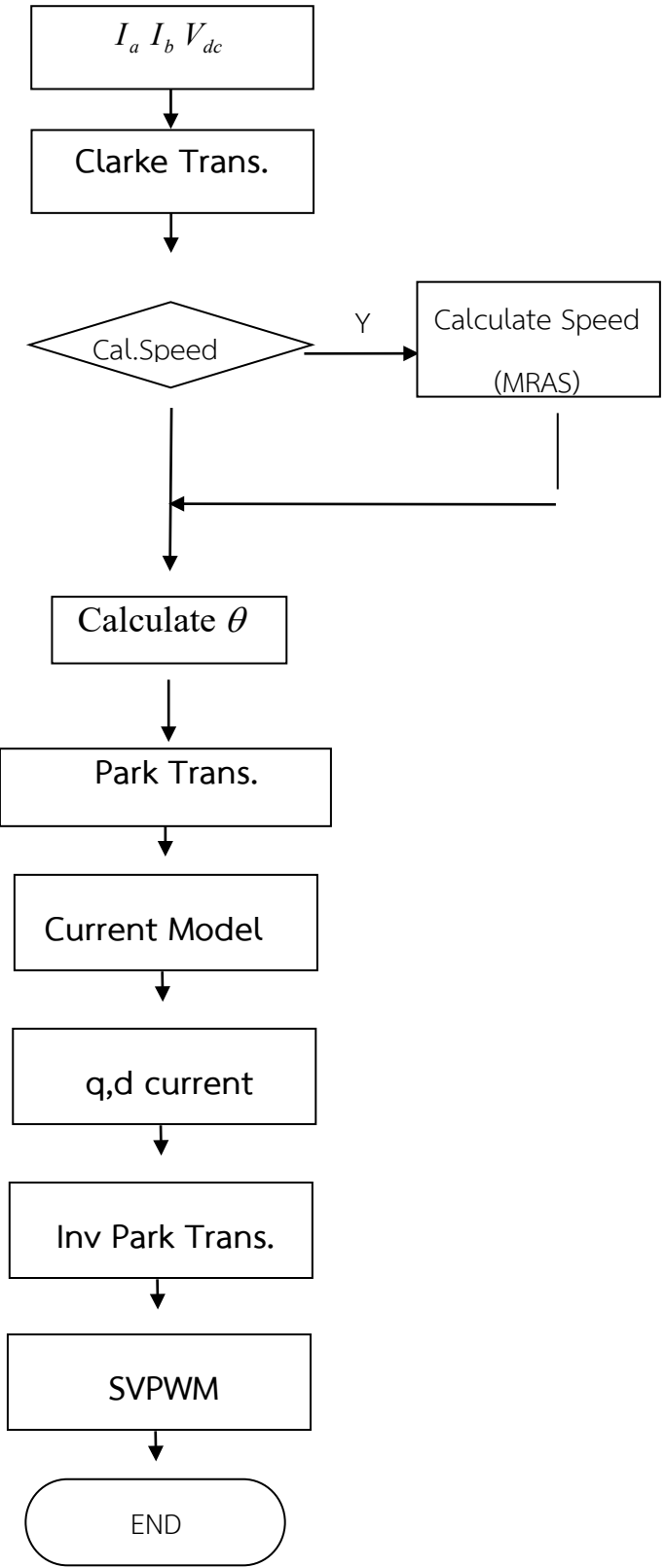




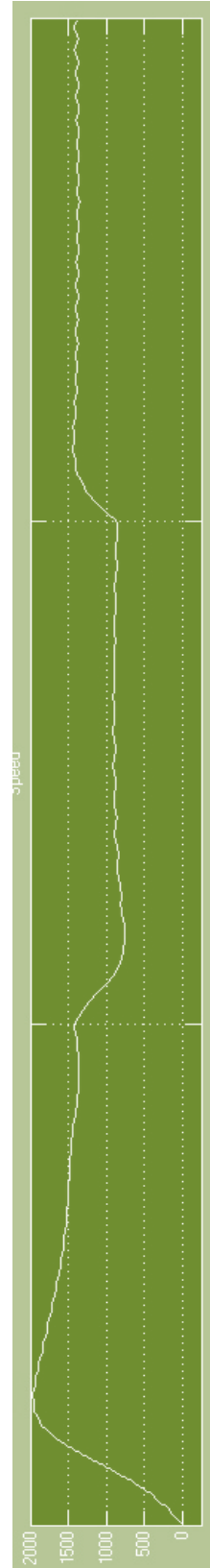
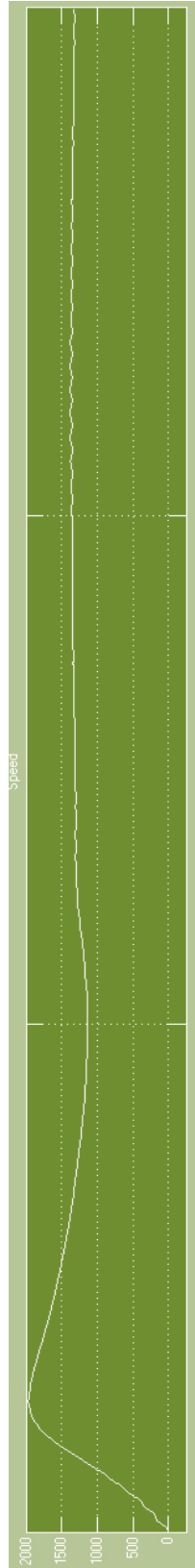
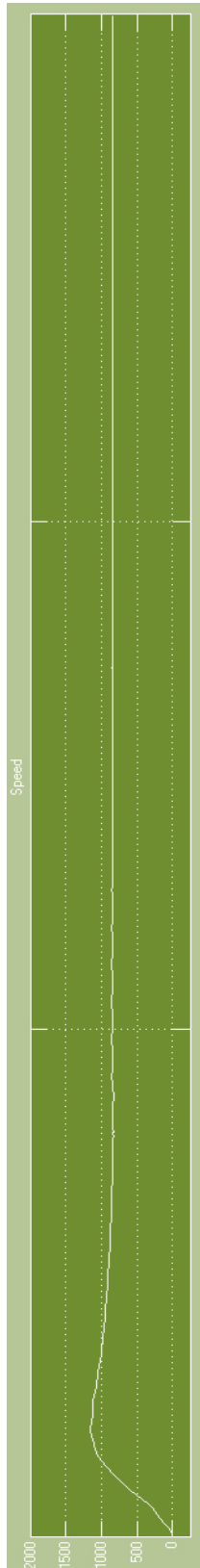
รูปที่ 3-20 แสดงระบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัว (MRAS)

จากรูปที่ 3-16 ถึง 3-20 นำบล็อกต่างๆ ไปเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ตามโครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมกระแสดังใน Flowchart รูปที่ 3-21 และรูปที่ 3-22 ซึ่งเป็นแบบจำลองการควบคุมแบบปรับตัวได้ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ของงานวิจัยนี้ จะเห็นว่า ระบบควบคุมเวกเตอร์ต้องทราบข้อมูลความเร็วโรเตอร์จริงมาใช้ในการคำนวณความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ เพื่อหาตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์ จากการแก้ปัญหาของติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วจึงเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาของการใช้งานเซนเซอร์วัดความเร็วดังที่กล่าว เพื่อการแก้ปัญหานี้จึงได้มีการพัฒนาระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วขึ้นโดยอาศัยการประมาณค่าความเร็วแทนการใช้เซนเซอร์ความเร็ว ดังนั้นสมรรถนะและเสถียรภาพของระบบควบคุมเวกเตอร์จึงขึ้นอยู่กับระบบประมาณความเร็วเป็นสำคัญ





รูปที่ 3-21 Flowchart แสดงขั้นตอนการคำนวณการควบคุมเวกเตอร์ปรับตัวได้



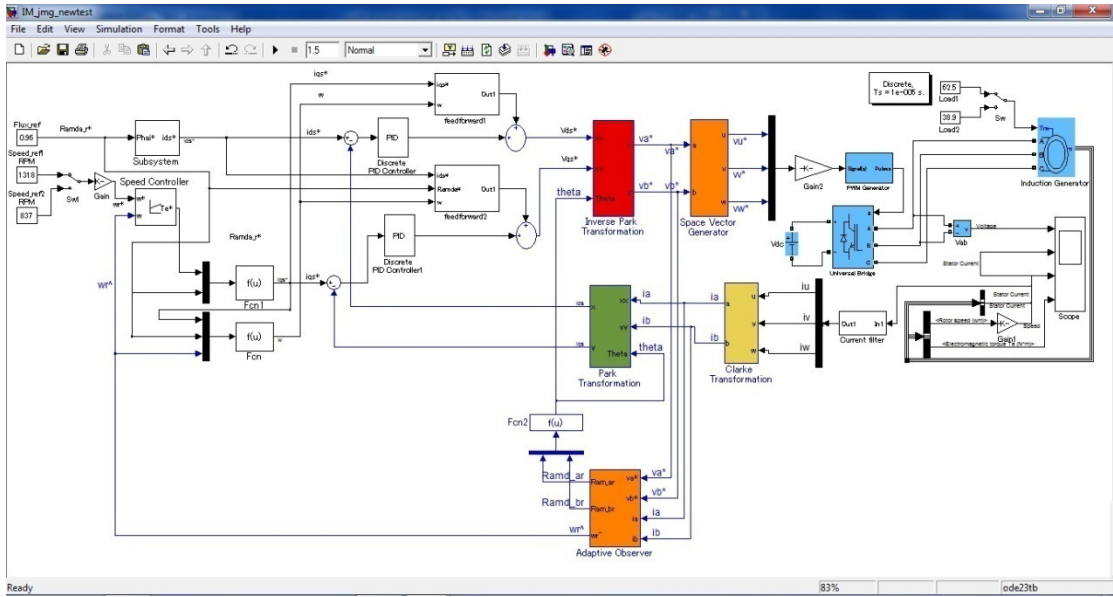
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.22 แสดงผลการควบคุมแบบปรับตัวได้จำลองความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

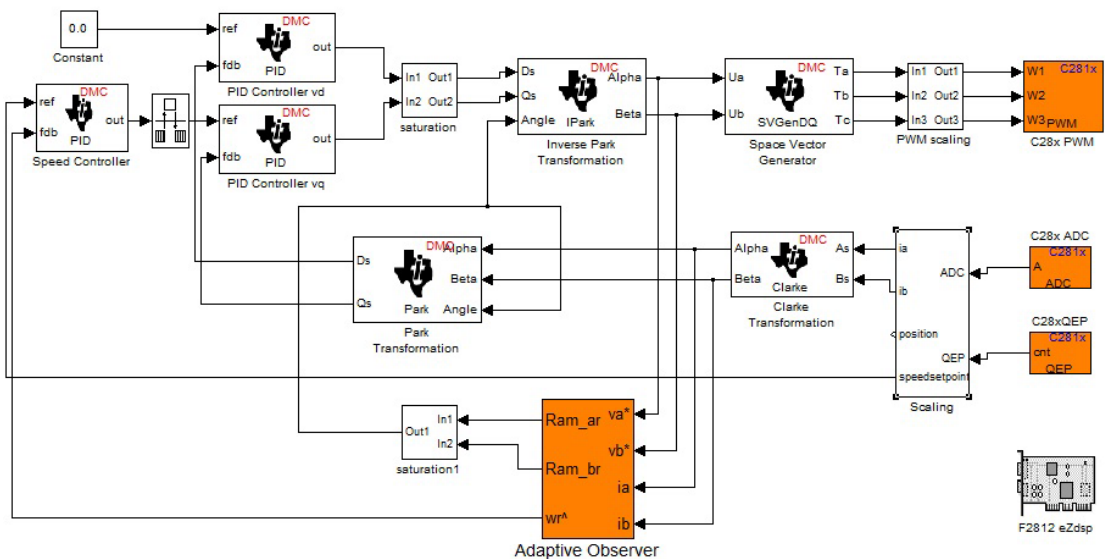
จากตารางที่ 3.3-34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของกังหันลมที่ความเร็วลม 3 และ 4 m/s ตามลำดับ โดยแสดงค่าที่ Tip speed ratio ทุกช่วงการคำนวณ โดยจากผลการคำนวณดังในหัวข้อ 3.1 ได้เลือกช่วง Tip speed ratio (λ) ประมาณ 1.1 ถึง 1.3 จึงนำมาสรุปในตารางที่ 3.5 ซึ่งผลจากการออกแบบมีความจำเป็นจะต้องควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วลม 3 m/s ที่ความเร็วรอบ 837 รอบต่อนาที (จากการใช้อัตราส่วนเกียร์ 55.78) ซึ่งความเร็วรอบของกังหันลมที่ 15 รอบต่อนาที ได้ค่าทอร์กกังหันลมเพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 62.5 นิวตันเมตร และที่ความเร็วลม 4 m/s ที่ความเร็วรอบ 1319 รอบต่อนาที (จากการใช้อัตราส่วนเกียร์ 55.78) ซึ่งความเร็วรอบของกังหันลมที่ 23 รอบต่อนาที ได้ค่าทอร์กกังหันลมเพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 38.9 นิวตันเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบมาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง เพื่อการควบคุมความเร็วรอบแบบปรับตัวได้ดังแสดงได้จากผลการจำลองความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 3-22(ก) ที่ความเร็วรอบ 1319 รอบต่อนาที ข) ที่ความเร็วรอบ 837 รอบต่อนาที และ ค) ที่ความเร็วรอบ 1319 รอบต่อนาทีปรับลดเป็นความเร็วรอบ 837 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบตามความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงไปได้จริง



รูปที่ 3-23 แสดงแบบจำลองการควบคุมแบบปรับตัวได้ โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

3.2.5 การควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิทัลรุ่น ezdsp TMS320F2812

เมื่อได้แบบจำลองการควบคุมแบบปรับตัวได้โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้การเขียนโปรแกรมติดต่อกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลรุ่น ezdsp TMS320F2812 ของบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์ (Texas Instrument) ผ่านโปรแกรม Code Composer Studio ซึ่งใช้งานร่วมกับโปรแกรม Matlab/Simulink จะทำหน้าที่สร้างโค้ดอัตโนมัติจากบล็อกต่างๆ ที่สร้างด้วยโปรแกรม Simulink ผ่านการอัลกอริทึมที่เรียกว่า Real Time Workshop (RTW) ของโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3-23

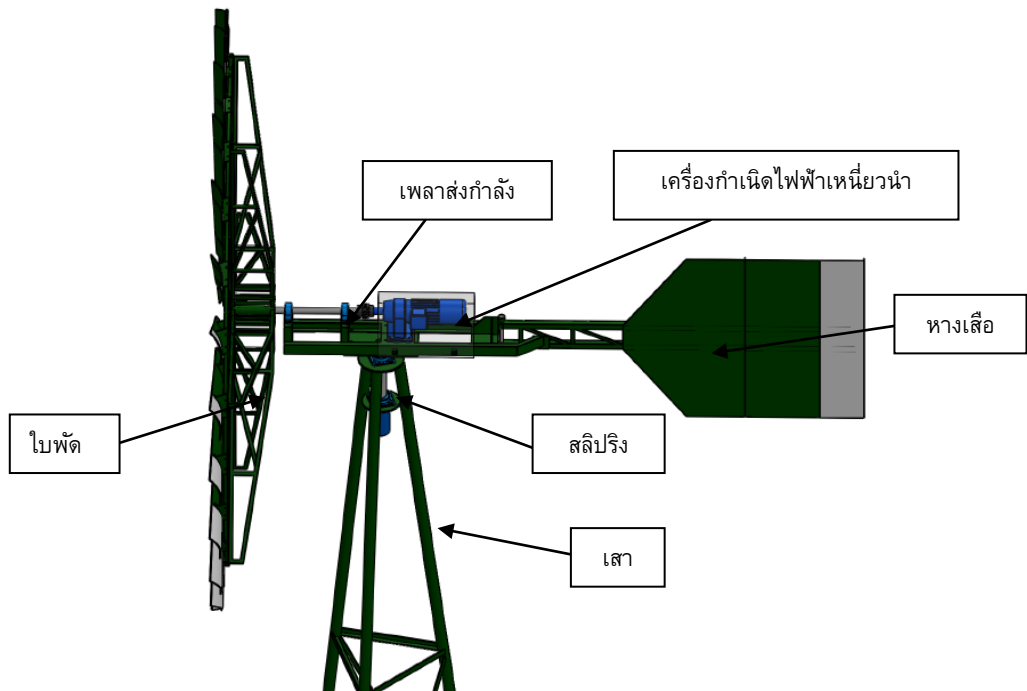


รูปที่ 3-24 ระบบควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812

บทที่ 4

การผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง สำหรับกังหันลมหลายใบ

สำหรับในบทนี้มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างกังหันลมหลายใบที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง และทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเอง จากการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่ศักยภาพที่เหมาะสม กล่าวคือการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองสำหรับกังหันลมหลายใบ ซึ่งได้นำผลจากการออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกลที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง ร่วมกับการออกแบบกังหันลมแนวแกนนอนแบบหลายใบเชิงทฤษฎีสำหรับพื้นที่ความเร็วลมต่ำ เพื่อนำผลจากการออกแบบมาดำเนินการสร้างจริง โดยกังหันลมที่ใช้นำเอากังหันลมแบบหลายใบ ซึ่งปกติกังหันลมชนิดนี้มักจะถูกใช้สำหรับสูบน้ำในการเกษตร ทดสอบโดยเลือกกังหันลม 24 NEA 420 ของ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2544) โดยกังหันลมที่ใช้ทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 เมตร จำนวน 24 ใบพัด ความยาวคอर्डด้านกว้าง 0.23 เมตร ความยาวคอर्डด้านแคบ 0.16 เมตร ความยาวใบพัด 1.2 เมตร ที่มีอัตราส่วนความโค้ง 0.07 มุมการติดตั้งใบพัดที่ 29 องศา ความสูงของกังหันลม 15 เมตร นำมาออกแบบให้เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในอัตราทด 1 ต่อ 55.78 โดยทำการบันทึกผลที่ความเร็วลมสามระดับคือ 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบหลักของกังหันลม

4.1 การออกแบบกังหันลม

พิจารณาการออกแบบกังหันลมแบบหลายใบ เป็นกังหันลมที่มีความเร็วรอบต่ำ ให้แรงบิดสูง กรณีที่นำมอเตอร์เกียร์มาทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำเป็นต้องทราบแรงบิด และความเร็วรอบของกังหันลมในกรณีที่ไม่มีภาระต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อน เพื่อนำไปเลือก รูน และ ขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสม ดังนั้น การคำนวณออกแบบจึงเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

จากหลักการของกังหันลมที่มีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานกลแล้วจึงเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ที่สามารถสกัดได้หาได้จากสมการ

$$P_w = C_p (\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4-1)$$

เนื่องจากค่า สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของกังหันลมขึ้นอยู่กับค่าความเร็วลม (V) ความเร็วรอบ (ω) และมุมพิช (β) ในขั้นนี้เราจะพิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ยังไม่มีการปรับค่ามุมพิช ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วขอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการ

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (4-2)$$

แต่กังหันลมที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้ Torque (Q) เป็นหลัก จึงได้ว่า

$$Q = C_Q \frac{1}{2} \rho V^2 A R \quad (4-3)$$

จากนั้น นำค่า Torque (Q) และ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด (C_Q) ที่ได้จากสมการ (4-3) หาค่าพื้นที่ของใบกังหันลม(A) ที่ผลิต Torque (Q) จะได้

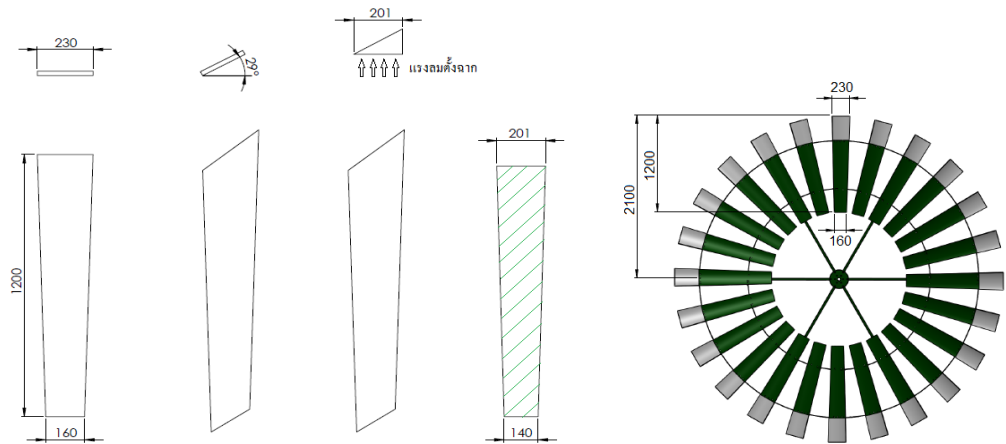
$$A = \frac{2Q}{C_Q \rho V^2 R} \quad (4-4)$$

เมื่อทราบค่า พื้นที่ของใบกังหันลม (A) จะทำให้เราสามารถระบุค่า C ที่กังหันลมต้องการได้ ตามสมการการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 2 จะได้จาก

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู} &= \frac{1}{2} \times \text{ผลบวกด้านคู่ขนาน} \times \text{สูง} \\ &= \frac{1}{2} \times (\text{ความยาวคอर्डด้านกว้าง} + \text{ความยาวคอर्डแคบ}) \times \text{ความยาวใบพัด} \end{aligned}$$

เมื่อคิดพื้นที่ของใบกังหันจำนวน (B) ใบ

$$A = \left(\frac{1}{2} \times (C + 1.436C) \times L \right) \times B \quad (4-5)$$



รูปที่ 4-2 แสดงพื้นที่ใบพัดและขนาดของชุดใบกังหัน

4.2 การเลือกขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

นอกจากจะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้วยังสามารถเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยมีตัวเก็บประจุสร้างกำลังไฟฟ้าน้ำรีแอคทีฟ ถูกควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมในการผลิตไฟฟ้าและระบบป้องกันด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในรูปแบบจัดเก็บไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งการทำให้อัตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

- 1) ให้อัตอร์เหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วมากกว่า Synchronous speed ($n_r > n_s$)

2) ใช้หลักการที่ว่าภายในสเตเตอร์มีสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual flux) หลงเหลืออยู่แล้ว ต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) เข้าไปช่วยในการเสริมสร้างแรงดัน (Build-Up Voltage) ให้มากขึ้น เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งเน้นประสิทธิภาพสูงสุดของส่วนประกอบแต่ละส่วนแต่เพื่อให้การดำเนินการวิจัยบรรลุผลตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ในที่นี้เลือกมอเตอร์เกียร์จำเป็นต้องทราบแรงบิดของกังหันลมที่ส่งผ่านกำลังมาที่เพลากังหันลมตามสมการที่ (4-3) ผ่านเกียร์ทด ซึ่งต้องทราบพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยแบ่งออกเป็น 2 สถานะคือ ขณะทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เงื่อนไขที่สำคัญในการพิจารณา สถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (พุทธพร เสวตสกุลานนท์ และวิจิตร กิณเรศ, 2551) จะพิจารณาจากค่าสลิปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4-6)-(4-7)

$$\text{motor} : n_r < n_s : s_m = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \text{ค่าบวก} \quad (4-6)$$

$$\text{Generator} : n_r > n_s : s_g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \text{ค่าลบ} \quad (4-7)$$

เมื่อความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหาได้จาก

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (4-8)$$

โดยที่ n_s : ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

n_r : ความเร็วโรเตอร์

f : ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

P : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

กำลังทางกลที่จ่ายให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (P_{in})

$$P_{in} = T\omega_r \quad (4-9)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดที่สเตเตอร์ ($P_{cu, stator}$)

$$P_{cu, stator} = 3I_1^2 R_1 \quad (4-10)$$

โดยที่ R_1 : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (โอห์ม)

I_1 : กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (แอมป์)

f : ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

P : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขดลวดที่โรเตอร์ ($P_{cu, rotor}$)

$$P_{cu, rotor} = 3I_2^2 R_2 \quad (4-11)$$

กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (P_{out})

$$P_{out} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (4-12)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (η)

$$Effency : \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4-13)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses} \quad (4-14)$$

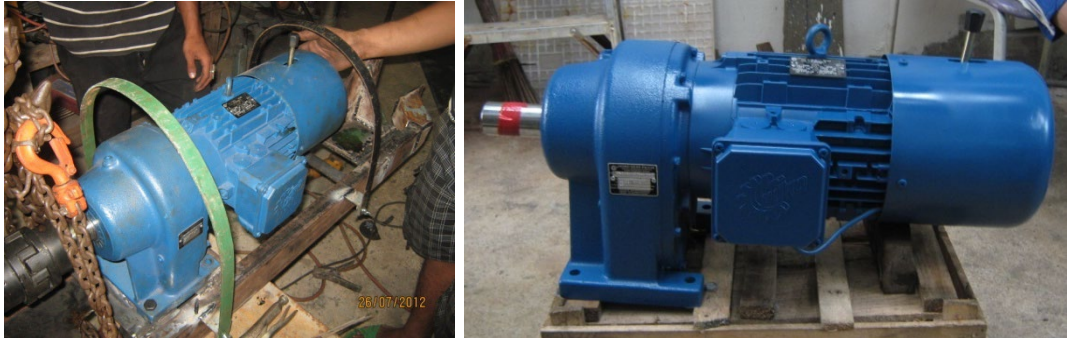
$$P_{in} = P_{out} + P_{cu, stator} + P_{cu, rotor} \quad (4-15)$$

สำหรับพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน (Standard Machine) ใช้มอเตอร์เกียร์แบบกรงกระรอก ยี่ห้อ Nord ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ หรือ 3 แรงม้า อัตราทดเกียร์ 1: 55.78 ดังรูปที่ 4-3 และ 4-4 ซึ่งทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (พุทธพร เสวตสกุลานนท์ และวิจิตร กิณเรศ, 2551) ดังตารางที่ 4-1 ประกอบด้วย การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (No-load test) การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block rotor test) และการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ อ้างอิงการทดสอบตาม IEEE std112-1996 Method F-F1

ตารางที่ 4-1 ป้ายพิกัดและพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

Type	R1	R2	Rc	X1	X2	Xm
Standard Machine	3.17	2.56	627.37	3.48	3.48	93.43
2.2 kW, 220/380 V, 4 Pole, 8.7/5.2 A, 1420 rpm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
High Efficiency Machine	1.40	1.81	568.50	3.31	3.31	75.76
2.2 kW, 220/380 V, 4 Pole, 8.2/4.7 A, 1465 rpm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω

ที่มา : พุทธพร เสวตสกุลานนท์ และวิจิตร กิณเรศ (2551).



รูปที่ 4-3 มอเตอร์เกียร์ยี่ห้อ Nord



รูปที่ 4-4 nameplate motorgear

4.3 ผลการวิจัย

จากการศึกษา ออกแบบ สร้างกังหันลมชนิดหลายใบที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ได้ดำเนินการติดตั้งดังรูปที่ 4-5 โดยมีชุดควบคุมการผลิตไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังผ่านชุดสลิปริงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 4-6 การศึกษากลไกการขับเคลื่อนทางกลและทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลม นั้น จะแบ่งการทดสอบเป็นสองแบบดังนี้

1. ทดสอบแบบใช้ความเร็วลมเป็นหลัก คือ ทำการบันทึกผลที่ความเร็วลมด้วยเครื่องมือวัดยี่ห้อ Daiichi รุ่น AM 066 อยู่ในไม่มีความละเอียดในการวัดค่าความเร็วลม 0.1 เมตรต่อวินาที โดยวัดความเร็วลมที่ 3, 4 และ 5 เมตร/วินาที บันทึกผลในช่วงเวลาที่มีความเร็วลมสม่ำเสมอในช่วงเวลา 13.00 -16.00 น. จำนวน 10 ค่า ทดสอบทำซ้ำ จำนวน 3 การทดลองในช่วงเวลาเดียวกัน รวมการบันทึกผล 30 ค่า เก็บค่า ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า

2. ทดสอบแบบต่อเนื่อง คือ ทำการบันทึกผลในทุกๆ 5 นาทีภายในระยะเวลาที่กำหนด ทดสอบทำซ้ำ 2 การทดลอง ไม่พิจารณาช่วงลมสงบ และนำค่าเฉลี่ยจากการทดสอบมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับกำลังการผลิตไฟฟ้า คำนวณหาลำลังการผลิตไฟฟ้าในหน่วย kW-h

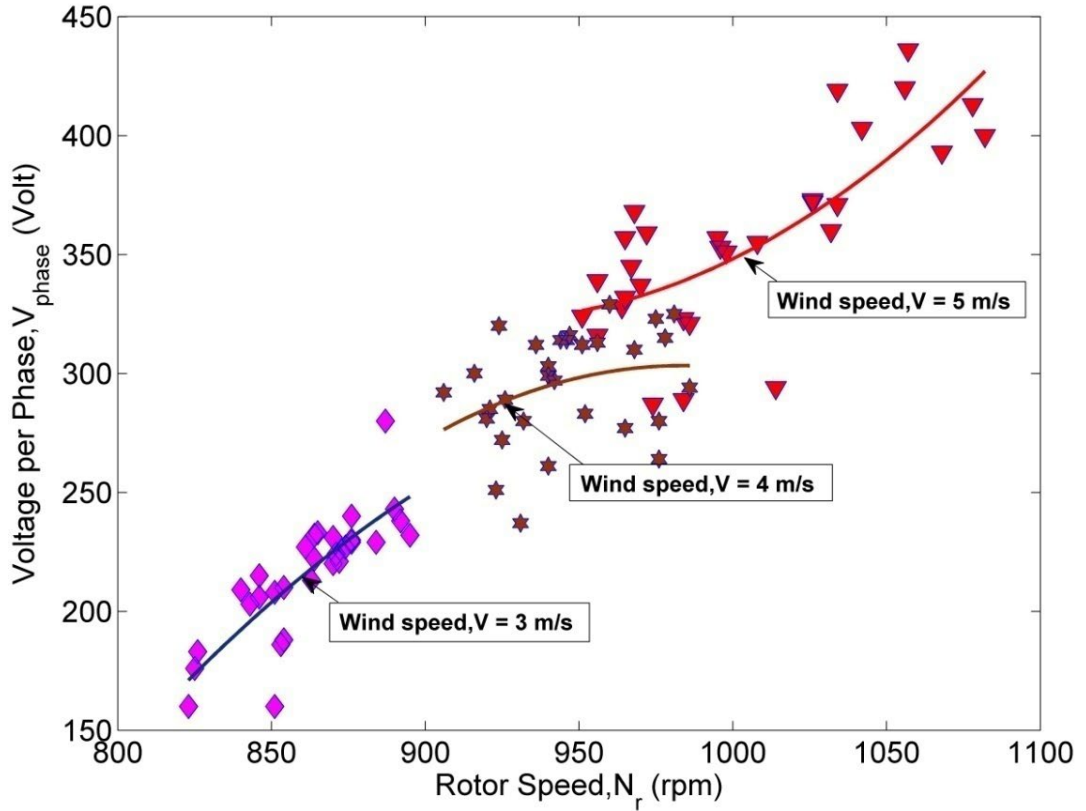


รูปที่ 4-5 การติดตั้งกังหันลม

จากรูปที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงความเร็วลม 3 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นการควบคุมค่าความต้านทานสเตเตอร์ โดยปรับค่าให้เหมาะสมในช่วงความเร็วลมต่างๆ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้ทำงานอยู่ในพิกัด จากการทดลองเมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองขนาดพิกัด 3 แรงม้า ใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาด 90 ไมโครฟารัด ต่อแบบสตาร์ควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิตอลเบอร์ TMS320F2812 และขณะมีภาระทางไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานขนาด 1,000 วัตต์ ส่งผ่านกลไกการขับเคลื่อนทางกลจากกังหันลมหลายใบ จากการทดสอบได้ผลดังนี้ คือ ที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 862 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 216 โวลต์ กระแส 0.43 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 278.87 วัตต์ ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 946 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 295 โวลต์ กระแส 0.50 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 445.10 วัตต์ และที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 1004 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 356 โวลต์ กระแส 0.6 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 645.37 วัตต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4-6 ชุดควบคุมและป้องกันการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

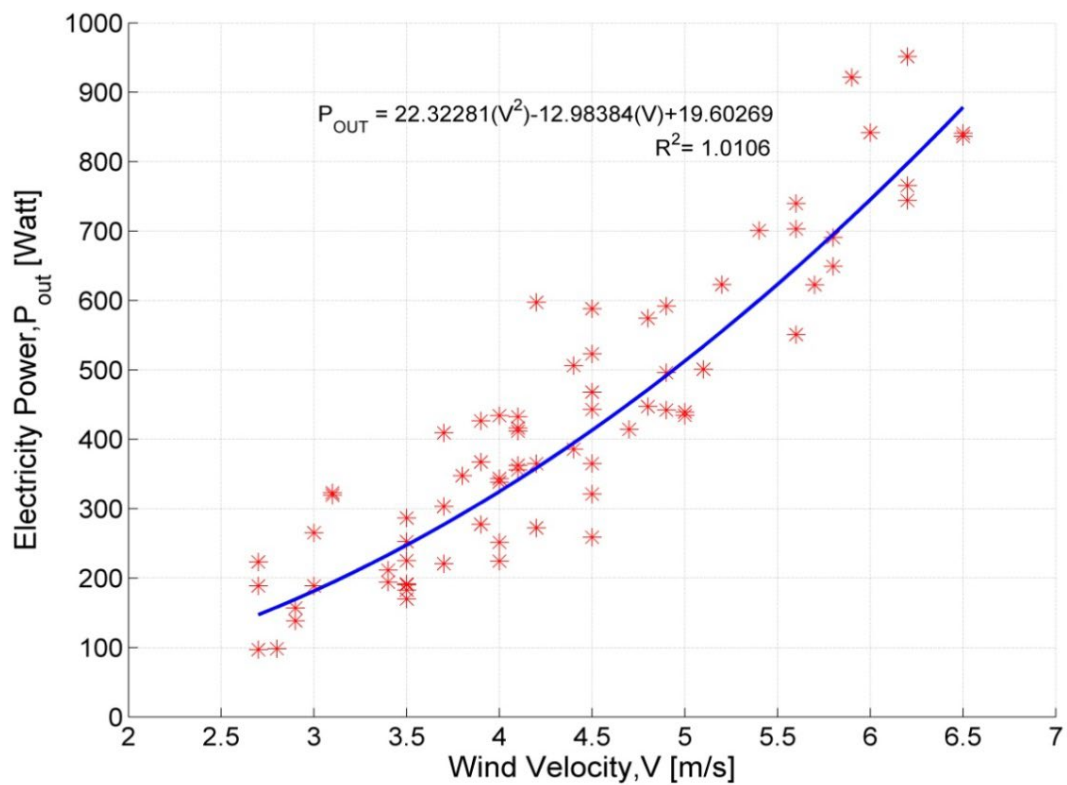


รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

รูปที่ 4-8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ทำการบันทึกผลความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 2.7 ถึง 6.5 เมตรต่อวินาที จากสมการกำลังไฟฟ้า $P_{out} = 22.32281(V^2) - 12.98384(V) + 19.60269$ สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้ โดยนำค่าของความเร็วลมแทนลงในสมการ และจากกราฟสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มมากขึ้นกำลังการผลิตไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากผลการทดสอบแบบต่อเนื่อง กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.423 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ตารางที่ 4-2 แสดงข้อมูลความเร็วรอบ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)			แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (mA)			กำลังไฟฟ้า (Watts)		
	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
1	861	951.5	999.9	308.6	513.5	593.2	433.7	508.8	565.6	159.8	293.7	387.1
2	865.7	947.5	1017.8	380.4	449.5	660.3	418.4	482.1	598.8	159.5	216.6	397.0
3	859.5	939.3	993.1	360.4	505.2	598.8	431.4	515.5	567.8	163.3	260.5	341.7
เฉลี่ย	862.1	946.1	1003.6	349.8	489.4	617.4	427.8	502.1	577.4	160.8	256.9	375.3



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 4-3 แสดงข้อมูลความเร็วรอบ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2				
ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงดันไฟฟ้า (Volt)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (Watts)	ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงดันไฟฟ้า (Volt)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (Watts)
3.5	826	278.0	379.4	105.4	3	843	352.3	435.0	153.2
6.5	1128	755.6	642.5	485.4	5	856	490.0	511.9	250.7
3.9	918	486.0	506.6	246.1	3.5	868	286.7	383.6	109.9
5.6	1054	673.4	602.8	405.8	4.1	20	486.6	513.2	249.7
5.4	1036	672.3	601.9	404.6	3	851	276.8	393.7	180.9
5.8	1138	665.6	599.1	398.8	4.2	884	436.1	483.1	210.7
4.8	986	589.8	562.2	331.5	3.9	896	437.7	484.6	212.1
4.5	916	498.5	513.1	255.8	3.4	878	289.1	388.0	112.1
4.9	976	497.7	512.8	255.2	4.9	990	598.6	570.9	341.6
5.2	1020	620.9	579.2	359.6	6.2	1086	712.5	620.3	444.2
3.7	832	315.6	403.9	127.5	4.1	925	470.6	505.3	237.8
3.5	822	345.2	422.3	145.7	4.8	974	498.7	517.8	258.2
3.8	867	425.5	471.6	200.6	4.4	946	541.2	539.9	292.2
2.7	846	283.5	384.8	109.0	3.9	860	365.4	438.5	160.2
4	945	318.5	406.8	129.6	3.5	826	259.1	379.0	98.1

4.1	896	437.0	479.0	209.2	4	878	341.1	425.7	145.2
4	875	417.5	468.0	195.3	5.8	1015	637.2	588.2	374.9
3.5	846	375.3	440.9	165.4	5.1	912	537.3	538.2	289.1
4.5	974	402.2	460.7	185.3	4.5	925	513.9	525.9	240.2
4.5	865	350.6	426.4	149.5	3.4	816	306.8	398.1	121.9
3.1	895	402.7	463.1	186.4	3.5	826	286.9	385.7	110.6
4.5	867	440.4	478.5	210.7	4.1	906	475.8	505.3	239.3
5.6	1062	695.9	613.7	427.0	3.7	864	385.5	454.3	175.1
2.7	821	178.9	313.0	56.0	4.5	985	596.5	569.3	355.6
2.7	846	317.2	406.6	129.0	4.1	916	427.6	480.8	205.6
5.6	995	573.0	555.1	318.1	4.5	947	552.3	546.8	302.0
3.7	917	471.5	501.1	236.2	4.2	995	602.7	572.1	344.7
4	914	492.2	509.2	250.6	4.9	965	534.7	535.5	286.3
2.9	785	233.6	342.1	80.1	3.5	846	316.9	410.2	130.0
4.7	945	474.0	504.8	239.2	4.4	906	453.6	491.0	222.7
5.9	1147	802.1	663.3	532.1	5	918	494.2	513.3	253.6
6.5	1145	754.6	639.9	482.8	5.7	986	744.2	483.0	214.5
6	1118	757.4	641.7	486.0	6.2	1036	698.2	615.4	248.4
6.2	1195	820.2	669.8	449.3	3.1	865	403.6	457.2	184.5
2.8	756	180.0	315.8	57.1	4	876	421.8	470.1	169.3
2.9	823	249.0	364.1	90.6	4.2	847	362.8	433.5	157.0

ตารางที่ 4-4 ตารางเปรียบเทียบผลของกำลังการผลิตไฟฟ้ากับความเร็วมอเตอร์แต่ละระดับ

ความเร็วมอเตอร์ (m/s)	ความเร็วกังหันลม (rpm)	ความเร็วโรเตอร์ (rpm)	กำลังไฟฟ้า (Watts)	Tip speed ratio	สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_D)	สัมประสิทธิ์กำลัง (C_P)
3	15	862	278.87	1.13	0.221	0.25
4	17	946	445.10	0.93	0.193	0.18
5	18	1004	645.37	0.79	0.189	0.15

ตารางที่ 4-5 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ากับความเร็วมอเตอร์แต่ละระดับ

ความเร็วมอเตอร์ (V)	ความสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์	ความสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์	P_{in}	P_{out}	ประสิทธิภาพ (%)
m/s	$P_{cu, stator}$	$P_{cu, rotor}$			

3	257.15	207.66	625.61	160.8	25.70
4	257.15	207.66	721.71	259.9	35.59
5	257.15	207.66	840.11	375.3	44.67

4.4 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างกังหันลมชนิดหลายใบที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เพื่อศึกษากลไกการการขับเคลื่อนทางกลและทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม จากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้ จากผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมแตกต่างกัน พบว่ามีผลต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยตรง ที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 862 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 216 โวลต์ กระแส 0.43 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 278.87 วัตต์ ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 946 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 295 โวลต์ กระแส 0.50 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 445.10 วัตต์ และที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 1004 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 356 โวลต์ กระแส 0.6 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 645.37 วัตต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการทำงานของกังหันลมแบบต่อเนื่องจากสมการกำลังไฟฟ้า $P_{out} = 22.32281(V^2) - 12.98384(V) + 19.60269$ คิดเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อชั่วโมงได้เท่ากับ 0.423 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง แต่กำลังการผลิตนี้จะได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับศักยภาพของพลังงานลมในเวลาที่ทำการบินที่ผลด้วย หากศักยภาพพลังงานลมต่ำก็จะมีกำลังการผลิตต่ำ และหากมีศักยภาพพลังงานลมสูงก็จะมีกำลังการผลิตสูงขึ้นไปด้วย

4.5 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่ากังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมประมาณ 2.7 เมตรต่อวินาที โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงเพื่อชดเชยกระแสกระตุ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด จึงควรเลือกตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับช่วงย่านการทำงาน ไม่เกินค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรืออาจมีการพัฒนาให้กังหันสามารถเริ่มผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่ำกว่านี้ เช่น การเปลี่ยนอัตราของเกียร์ทดแต่ต้องคำนึงถึงแรงบิดของกังหันลมผ่านกลไกการขับเคลื่อนทางกลที่เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย โดยในส่วนของงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งการทำให้กังหันลม

ทำงานได้ตามต้องการนั้น จำเป็นต้องใช้เทคนิคการควบคุมแบบปรับตัวได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง ให้สัมพันธ์กับความแปรผันของความถี่ ความเร็วรอบของเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าให้มีความเร็วรอบคงที่กับการผลิตกระแสไฟให้มีความสม่ำเสมอเหมาะแก่การใช้งานต่อไป

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทำโครงวิจัยเรื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองเพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลมสามารถตอบคำถามวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1) ความเป็นไปได้ของการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าในกังหันลม โดยไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง สามารถใช้งานได้ โดยต้องคำนึงถึงการออกแบบใบพัดกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมเฉพาะแหล่ง และจำนวนความเร็วรอบที่ได้จากปลายเพลากังหันลม ที่มีทอร์กในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

2) ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง เพื่อการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าในกังหันลมตามศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง ที่ทำการวิจัย เลือกพื้นที่ติดตั้งในจังหวัดเพชรบุรี (บึงปรืดาร์สอร์ท) ซึ่งความเร็วลมเฉพาะแหล่งในจังหวัดเพชรบุรี มีค่าความเร็วลมประมาณ 3-4 เมตรต่อวินาที จากการติดตั้งกังหันลมที่ใช้ทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 เมตร จำนวน 24 ใบพัด ความยาวคอร์ดด้านกว้าง 0.23 เมตร ความยาวคอร์ดด้านแคบ 0.16 เมตร ความยาวใบพัด 1.2 เมตร ที่มีอัตราส่วนความโค้ง 0.07 มุมการติดตั้งใบพัดที่ 29 องศา ความสูงของกังหันลม 15 เมตร นำมาออกแบบให้เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในอัตราทด 1 ต่อ 55.78 โดยทำการบันทึกผลที่ความเร็วลมสามระดับคือ 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาทีตามลำดับนั้น พบว่าความเร็วลมมีผลต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยตรง โดยที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 862 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 216 โวลต์ กระแส 0.43 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 278.87 วัตต์ ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 946 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 295 โวลต์ กระแส 0.50 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 445.10 วัตต์ และที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วโรเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 1004 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 356 โวลต์ กระแส 0.6 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 645.37 วัตต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการทำงานของกังหันลมแบบต่อเนื่องจากสมการกำลังไฟฟ้า $P_{out} = 22.32281(V^2) - 12.98384(V) + 19.60269$ คิดเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อชั่วโมงได้เท่ากับ 0.423 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพ 25.7%, 35.59% และ 44.67% ที่ความเร็วลม 3, 4 และ 5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการออกแบบกลไกการขับเคลื่อนทางกล (Mechanical Mechanism) ของกังหันลม แขนงอนที่เหมาะสม ควรเลือกกังหันลมที่จำนวนใบพัดเหมาะสมกับรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนกลไกการควบคุมทางไฟฟ้า(Electrical Mechanism) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเอง ในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมแบบปรับตัวได้ ออกแบบให้ติดตามค่าความเร็วรอบของกังหันลมผ่านเกียร์ทดรอบเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับความเร็วลม ซึ่งสามารถใช้บอร์ด ezdsp 2812 ควบคุมทันเวลา ตามความเร็วลมได้จริง

บรรณานุกรม

- A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik, "Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor," IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol.5, No. 4, December 1990. pp. 725-732.
- Chee-Mun Ong,"Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink",Prentice Hall,1998
- Frank M. White. (2003) **Fluid Mechanis. 4th ed. McGraw-Hill.**
- Hav, E. (2005). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics* , (2 nd ed.). UK: Springer.
- Jansen, W. A. M. (1976) **Horizontal Axis Fust Running Wind Turbine for Developing Country, S. W. D.**
- Lancashire,S., Kenna,J., & Fraenkel,P. (1987). *Windpumping Handbook*. London UK : Intermediate Technology Publications.
- Meel, J.V., & Smulders, P. (1989). *Wind Pumping A Handbook*. Washington D.C.,USA: The World Bank.
- P.Lumyong, and C. Chat-uthai. "Power Minimization Technique for Induction Motor Load Test." IEEE Conference IPEMC 2000. Vol.2, August 2000. pp.570-573.
- Paul C.Krause, "Analysis of electric machinery",McGraw-Hill,1987.
- Texas Instrument. "Ezdsp f2812 Technical Reference." Rev. F, Sept. 2003
- V. Subbiah, and K.Geetha, "Certain investigations on a grid connected induction generator with voltage control," Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. Vol 1, 8-11 January 1996. Pp. 439-444.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2544) "รูปแบบกักเก็บลม 24 NEA 420" ศูนย์พัฒนาและเผยแพร่พลังงาน ราชบุรี: ผู้แต่ง
- จิรพงษ์ จิตตะโคตร, (2547) "การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการปรับค่าความต้านทานสเตเตอร์" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- จิรพงษ์ จิตตะโคตร, (2550) "การพัฒนาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบปรับความเร็วรอบโดยการปรับแรงดันความถี่โดยดีเอสพี" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 103 หน้า

ทวีศักดิ์ ต้นอร่าม และ สลิลทิพย์ สีนุสนธิชาติ, (2551) “การศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน” ในการ *ประชุมเชิงวิชาการเครื่องข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4*, (น.488-492), นครปฐม : คณะวิทยาศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ณัฐภัทร พันธุ์คง, (2554) “การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแรงบิดโดยตรงบนพื้นฐานสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันโดยใช้ตัวอินทิเกรตที่ปรับตัวได้” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 84 หน้า

ณัฐพงศ์ เมืองจันทร์ และวิจิตร กิรินทร์, (2553) “การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบประมาณค่าความเร็วของการควบคุมแบบไร้เซ็นเซอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 หน้า 1-8

ณัด เหลืองนฤทัย, (2543) “ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์” บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 101 หน้า

นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน พฤษภาคม-กรกฎาคม 2556

นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน สิงหาคม-ตุลาคม 2556

นิตยสารธุรกิจไฟฟ้า เครื่องกล อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤศจิกายน 2556 – มกราคม 2557

ยุทธนา พลอยฉาย และกาญจนา สุขกระจ่าง, (2556) “การออกแบบกังหันลมแนวแกนนอนแบบหลายใบเชิงทฤษฎีสำหรับพื้นที่ความเร็วลมต่ำ” ในการ *ประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏสุราษฎร์ธานีวิจัย ครั้งที่ 9* (น. 2-10). สุราษฎร์ธานี : สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ยุทธนา พลอยฉาย และคณะ, (2557) “การผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นตัวเองสำหรับกังหันลมหลายใบ” ในการ *ประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 2* (น. 362-372). ภูเก็ต : สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

ยุทธชัย เกี้ยวสันเทียะ, (2547) “การศึกษาและพัฒนากังหันลมสำหรับการสูบน้ำในประเทศไทย” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล, (2552) “การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดีบีเปลยูเอ็ม” มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 88 หน้า

- วรภัทร กอแก้ว, (2547) “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นภายในตัวเองในพิกัดเวกเตอร์เชิงสนาม” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 69 หน้า
- พงศภัต สุขसनาน และ ยุทธนา พลอยฉาย, (2553) “การประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมบริเวณชายฝั่งทะเลของกลุ่มจังหวัดภาคกลางตอนล่าง” ในการ *ประชุมวิชาการเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติประจำปี 2553*. (น. B1-3# 1-10). นนทบุรี: สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน).
- พุทธพร เสวตสกุลานนท์ และ วิจิตร กิณเรศ, (2551) “การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐานและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูงขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานลมแบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง” ในการ *ประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4* (น.650-655). นครปฐม : คณะวิทยาศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- สิโรจน์ ใจขาน, (2552) “แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 90 หน้า
- สรพล คุ่มทรัพย์ และคณะ, (2553) “โครงการวิจัยเรื่อง เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบทันเวลา” มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดงขี้เหล็ก