

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนของระบบกึ่งหนึ่งแบบความเร็วผันแปร



นายชัยชนะนันต์ ตั้งสัมพันธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROBUST MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A VARIABLE SPEED WIND TURBINE SYSTEM

Mr. Chaiyanan Tangsamphan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนของระบบกึ่งหั่น
	ลมแบบความเร็วผันแปร
โดย	นายชัยะนันต์ ตั้งสัมพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขกร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พรชัย บำรุงศรี)

ชื่อย่อ: ตั้งสัมพันธ์ : การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนของระบบกักกันลมแบบ
ความเร็วผันแปร (ROBUST MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A VARIABLE SPEED
WIND TURBINE SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 57
หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมระบบกักกันลมแบบความเร็วผันแปรในตลอดช่วง
ดำเนินการ การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนชนิดออฟไลน์ถูกเลือกมาใช้ควบคุมในช่วงภาระ
บางส่วน และตัวควบคุมพีไอถูกใช้ควบคุมในช่วงภาระเต็ม นอกจากนี้การศึกษาระหว่างการเปลี่ยนโหมด
ควบคุมระหว่างภาระบางส่วนและภาระเต็ม (ช่วงการเปลี่ยนแปลง) ก็ถูกศึกษาเช่นเดียวกัน
แบบจำลองของฟาสต์ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองกระบวนการ ผลการจำลองกระบวนการพบว่า
ในช่วงภาระบางส่วนสมรรถนะของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนดีกว่าของตัวควบคุมพีไอ
และในช่วงการเปลี่ยนแปลงปัญหาไวน์ออฟถูกพบ ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมในช่วง
การเปลี่ยนแปลงไม่ดี อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวถูกแก้ไขได้โดยการติดตั้งตัวแอนตี้ไวน์ออฟให้กับตัว
ควบคุมมูไบพัด



ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5770148821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: A VARIABLE SPEED WIND TURBINE / RMPC / LPV

CHAIYANAN TANGSAMPHAN: ROBUST MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A VARIABLE SPEED WIND TURBINE SYSTEM. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR.SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 57 pp.

This research studies regarding the control of a variable speed wind turbine system in entire operating range. The offline robust model predictive control (RMPC) is selected to control in partial load regime and PI-controller is used to regulate in full load regime. Besides, the study of switching mode between partial and full load regimes, called transition regime, is also investigated. The FAST model is used to simulate the control system of wind turbine. The results showed that the performance of RMPC is better than PI-controller in partial load regime. In transition regime, windup problem is occurred. Such problem results in poor control performance in transition regime. However, this problem is solved by adding anti-windup in pitch control system.



Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้กำลังใจและแนวคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ทั้งในด้านการวิจัยและการดำเนินชีวิต

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ประธานกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อมรชัย อภรณ์วิชานพ กรรมการสอบ และอาจารย์ ดร. พรชัย บำรุงศรี กรรมการสอบ ที่ได้ให้ความสนใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และน้องๆ ในกลุ่มวิจัยด้านการควบคุมกระบวนการทุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ท้ายที่สุด งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการ “ทุนพัฒนาศักยภาพการวิจัยเชิงสถาบันของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” จากสำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย สัญญาเลขที่ IRG5780014 และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รหัสสประกาศ RES_57_411_21_076

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบกักทันลมผลิตกระแสไฟฟ้า.....	5
2.2 สมการแบบจำลองเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying)	11
2.3 การสร้างสมการแบบจำลอง	12
2.4 การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	14
บทที่ 3 ทบทวนวรรณกรรม.....	16
3.1 การควบคุมระบบกักทันลมผลิตกระแสไฟฟ้า	16
3.2 การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	18
3.3 การประมาณความเร็วลม	19
บทที่ 4 ระเบียบวิจัย.....	20

4.1 ความเร็วลมที่ใช้ในการศึกษา.....	20
4.2 การควบคุมในช่วงภาระบางส่วน	21
4.3 การควบคุมในช่วงภาระเต็ม	23
4.4 การควบคุมในช่วงการเปลี่ยนแปลง.....	24
4.5 ระบบกักเก็บลมที่ใช้ในการศึกษา.....	24
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	26
5.1 การศึกษาตัวทำนายความเร็วลม (wind predictor)	26
5.2 การศึกษาการควบคุมในช่วงภาระบางส่วน (partial load regime).....	29
5.2.1 การควบคุมในช่วงภาระบางส่วนโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน	29
5.2.2 การควบคุมในช่วงภาระบางส่วนโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ	36
5.2.3 เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนและตัวควบคุมพีไอ.....	38
5.3 การศึกษาการควบคุมในช่วงภาระเต็ม (full load regime)	39
5.4 การศึกษาการควบคุมในช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition regime)	41
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	47
รายการอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	57

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบกังหันลมไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า.....	5
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า.....	6
รูปที่ 2.3 แผนผังโครงสร้างสมการแบบจำลองของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า.....	7
รูปที่ 2.4 เครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์.....	9
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน.....	11
รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองแบบสแต็ป.....	13
รูปที่ 2.7 ลักษณะผลการตอบสนองสำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	15
รูปที่ 4.1 การติดตั้งตัวทำนายความเร็วลม.....	20
รูปที่ 4.2 ระบบการควบคุมแบบลูปปิดของตัวควบคุมพีไอในช่วงภาระบางส่วน.....	21
รูปที่ 4.3 ระบบการควบคุมแบบลูปปิดของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน.....	23
ในช่วงภาระบางส่วน	
รูปที่ 4.4 ระบบการควบคุมแบบลูปปิดของตัวควบคุมพีไอในช่วงภาระเต็ม.....	23
รูปที่ 4.5 การติดตั้งตัวแอนตี้ไวน์อัปชนิดค่านวนย้อนกลับ.....	24
รูปที่ 5.1 ความเร็วลมที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ 3 ถ้วย รุ่น SK-7760-00.....	26
รูปที่ 5.2 ความเร็วลมที่ถูกทำนายด้วยตัวทำนายความเร็วลมของ Nanayakkara (1997)	27
รูปที่ 5.3 ความเร็วลมที่ถูกทำนายด้วยตัวทำนายความเร็วลมของ Østergaard (2007)	27
รูปที่ 5.4 ความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วลมจริงกับความเร็วลมจากการทำนาย.....	28
ด้วยวิธีของ Østergaard	
รูปที่ 5.5 ชุดตัวแปรอินพุทที่ถูกใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของ LPV model.....	30
รูปที่ 5.6 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของ LPV model เทียบกับ FAST model.....	31
รูปที่ 5.7 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 1 Q=200, R=0.1)	31

รูปที่ 5.8	ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน.....	32
	(แบบที่ 1 $Q=200$, $R=0.1$)	
รูปที่ 5.9	ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 2 $Q=200$, $R=0.01$).....	32
รูปที่ 5.10	ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน.....	33
	(แบบที่ 2 $Q=200$, $R=0.01$)	
รูปที่ 5.11	ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน.....	33
	(แบบที่ 3 $Q=200$, $R=0.001$)	
รูปที่ 5.12	ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน.....	34
	(แบบที่ 3 $Q=200$, $R=0.001$)	
รูปที่ 5.13	ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 1 $T_c=10$)	36
รูปที่ 5.14	ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 2 $T_c=4$)	37
รูปที่ 5.15	ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 3 $T_c=1$)	37
รูปที่ 5.16	เปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน.....	39
	($Q=200$, $R=0.01$) และตัวควบคุมพีไอ ($T_c=4$)	
รูปที่ 5.17	ผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 1 $T_c=5$)	40
รูปที่ 5.18	ผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 2 $T_c=1$)	40
รูปที่ 5.19	ผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยตัวควบคุมพีไอดี (แบบที่ 3 $T_c=0.5$)	41
รูปที่ 5.20	ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (ไม่มีแอนตี้ไวน์ออฟ)	42
รูปที่ 5.21	ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (แอนตี้ไวน์ออฟ $k_b=0.1$)	43
รูปที่ 5.22	ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (แอนตี้ไวน์ออฟ $k_b=0.3$)	44
รูปที่ 5.23	ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (แอนตี้ไวน์ออฟ $k_b=1.0$)	44
รูปที่ 5.24	ผลการควบคุมกรณีลมกระโชก (gust)	45
รูปที่ 5.25	ผลการควบคุมกรณีลมยกกระดืบ (rise up)	46

รูปที่ ข-1 ผลตอบสนองแบบสเต็มสำหรับช่วงภาระบางส่วน..... 56

รูปที่ ข-2 ผลตอบสนองแบบสเต็มสำหรับช่วงภาระเต็ม.....56



สารบัญตาราง

หน้า

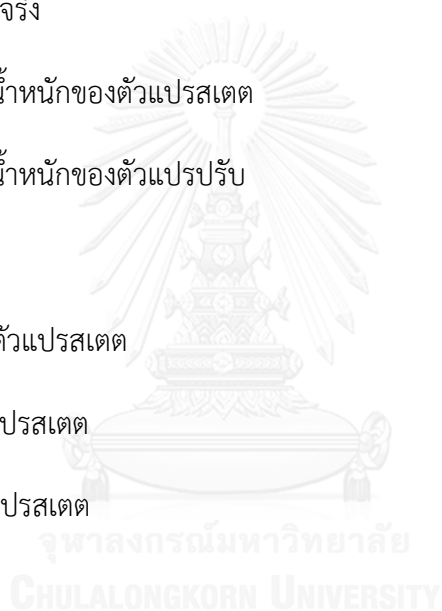
ตารางที่ 2.1	ความสัมพันธ์ของไทม์คอนสแตนท์กับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง.....	13
ตารางที่ 4.1	เซ็ตพอยต์ของความเร็วโรเตอร์ที่ความเร็วลมต่างๆ.....	21
ตารางที่ 4.2	ตำแหน่งดำเนินการสำหรับสร้างผลตอบสนองแบบสเต็ป.....	22
ตารางที่ 4.3	พารามิเตอร์และตัวแปรของระบบกึ่งหั่นลมที่ศึกษา.....	25
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรจากผลตอบสนองแบบสเต็ป.....	30
ตารางที่ 5.2	เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนด้วย..... การจูนแบบต่างๆ	35
ตารางที่ 5.3	เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอโดยใช้การจูนแบบต่างๆ.....	38
ตารางที่ 5.4	เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดต่างๆ.....	38
ตารางที่ 5.5	เปรียบเทียบผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยการจูนแบบต่างๆ.....	41
ตารางที่ 5.6	เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยการจูนตัวแอนตี้ไวน์ออฟแบบต่างๆ.....	45
ตารางที่ ก-1	ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Q=200, R=0.1).....	52
ตารางที่ ก-2	ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Q=200, R=0.01).....	53
ตารางที่ ก-3	ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Q=200, R=0.001).....	54
ตารางที่ ก-4	ค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้สำหรับตัวควบคุมพีไอดีในช่วงภาระบางส่วน.....	55
ตารางที่ ก-5	ค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้สำหรับตัวควบคุมพีไอดีในช่วงภาระเต็ม.....	55

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่รับลมทั้งหมดของใบพัด
a(i)	สัมประสิทธิ์ตัวที่ i สำหรับสมการทำนายความเร็วลม
C_p	สัมประสิทธิ์พลังงาน
B_{1s}	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเพลลา
FAST	เครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์ (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence)
F_t	แรงที่กระทำบนใบพัดอันเนื่องมาจากผลของลม
F_{th}	แรงที่กระทำบนดุมของกังหันลม
G	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ
h	ความสูงของดุม
IAE	ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Integral Absolute Error)
ISE	ผลรวมค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Integral Square Error)
J_g	ความเฉื่อยของตัวกำเนิด
J_r	ความเฉื่อยของโรเตอร์
K	ค่าแกนของตัวควบคุม
K_d	พารามิเตอร์การจูนสำหรับโหมดเดรีเวทีฟ
K_i	พารามิเตอร์การจูนสำหรับโหมดอินทิกรัล
K_{1s}	สัมประสิทธิ์ความแข็งของเพลลา
K_p	พารามิเตอร์การจูนสำหรับโหมดพรอพเพอซันนอล
K_t	สัมประสิทธิ์ความแข็งของเสา

k_b	พารามิเตอร์การจูนของตัวแอนตี้ไวน์อ็อปซิดค่านวณย้อนกลับ
LMI	อสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (Linear Matrix Inequality)
LPV	สมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying)
MPC	การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control)
M_f	มวลของเสา
N_g	สัดส่วนห้องทรอบกำลัง
NREL	National Renewable Energy Laboratory
P_a	พลังงานแอโรไดนามิก
P_g	พลังงานจากเจนเนอเรเตอร์
P_r	ค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
R	เมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรปรับ
RMPC	การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Robust Model Predictive Control)
RPM	รอบต่อนาที
r	รัศมีของโรเตอร์
T_a	แอโรไดนามิกทอร์ค
T_g	เจนเนอเรเตอร์ทอร์ค
$T_{g,ref}$	เจนเนอเรเตอร์ทอร์คอ้างอิง
t	ระยะเวลา
t_d	ระยะเวลาล่าช้าของตัวปรับมุมใบพัด
t_f	ระยะเวลาสุดท้าย
$t_{g,d}$	ระยะเวลาล่าช้าของตัวปรับเจนเนอเรเตอร์ทอร์ค

U_{max}	ค่าสูงสุดของตัวแปรปรับ
U_{min}	ค่าต่ำสุดของตัวแปรปรับ
u	ตัวแปรปรับ
V	ความเร็วลม
V_r	ความเร็วลมที่กำหนด
V_t	ความเร็วลมที่กระทบใบพัด
V_w	ความเร็วลมที่แท้จริง
W_1	สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของตัวแปรสเตต
W_2	สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับ
x	ตัวแปรสเตต
x_d	ค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรสเตต
x_{max}	ค่าสูงสุดของตัวแปรสเตต
x_{min}	ค่าต่ำสุดของตัวแปรสเตต
x^{SP}	เซตพ้อยต์
x_t	ระยะเวลาเคลื่อนไหวของเสา
y	ตัวแปรที่วัด
β	มุมใบพัด
β_{ref}	มุมใบพัดอ้างอิง
θ	เมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรสเตต
θ	ระยะเวลาล่าช้า
η_g	ประสิทธิภาพของเจนเนอเรเตอร์



ρ	ความหนาแน่นของอากาศ
λ	อัตราส่วนความเร็ว ณ ปลายใบพัด
τ	ไทม์คอนสแตนต์ของกระบวนการ
θ	สัดส่วนการสิ้นไหว
ω_g	ความเร็วเจนเนอเรเตอร์
ω_n	ความถี่โดยธรรมชาติของตัวปรับมุมใบพัด
ω_r	ความเร็วโรเตอร์



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งที่ยังคงสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตของมนุษย์ โดยที่พลังงานส่วนใหญ่ที่ถูกใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ได้รับมาจากแหล่งพลังงานจากฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้มีหลายหน่วยงานให้ความสนใจกับปัญหาดังกล่าวโดยพยายามศึกษาเพื่อที่จะหาแหล่งพลังงานสะอาดอื่นมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทน พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานสะอาดที่มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจ เพราะพลังงานลมเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไป อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย การใช้ประโยชน์จากพลังงานลมที่นิยมมากคือการใช้ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า (wind turbine system) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการหมุนของตัวกำเนิดไฟฟ้า (generator) ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีหลายประเภท แต่ประเภทที่ได้รับความนิยมมากเชิงพาณิชย์คือ ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดความเร็วผันแปรได้ (variable speed wind turbine system) เนื่องจากให้สมรรถนะและประสิทธิภาพสูง

ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดความเร็วผันแปรได้มีการแบ่งช่วงการดำเนินการออกเป็นสองช่วง ช่วงแรกคือช่วงภาระบางส่วน (partial load regime) ซึ่งมักถูกดำเนินการเมื่อความเร็วลมต่ำ จุดประสงค์หลักของช่วงภาระบางส่วนคือต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เจนเนอเรเตอร์ทอร์ค (generator torque) ถูกใช้เป็นตัวแปรปรับเพื่อที่จะควบคุมความเร็วโรเตอร์ (rotor speed) ให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วลมในขณะนั้น ทำให้ช่วงนี้ถูกเรียกว่า การควบคุมทอร์ค (torque control) อีกช่วงหนึ่งคือช่วงภาระเต็ม (full load regime) จะถูกดำเนินการเมื่อความเร็วลมสูงเกินค่าค่าหนึ่ง วัตถุประสงค์หลักของช่วงนี้คือการบรรเทาภาระอันเนื่องมาจากทอร์คของลมที่กระทำบนกังหันลม เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงและยืดอายุการใช้งานของกังหันลม โดยที่มุมใบพัด (pitch angle) ถูกใช้เป็นตัวแปรปรับเพื่อที่จะควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้อยู่ที่ค่าที่กำหนดไว้ (rated rotor speed) ทำให้ช่วงนี้ถูกเรียกว่า การควบคุมพิช (pitch control)

กลยุทธ์สำหรับควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นไปได้ 2 แนวทาง แนวทางแรกคือการใช้ตัวควบคุมหลายตัวแปร (multivariable controller) กล่าวคือ จะมีการติดตั้งตัวควบคุมเพียงตัวเดียวซึ่งทำหน้าที่ควบคุมระบบกังหันลมทั้งช่วงภาระบางส่วนและช่วงภาระเต็ม อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวมีความสามารถในการควบคุม (controllability) ต่ำ และมีความอนุรักษ์

(conservative) สูง กล่าวคือ ตัวแปรปรับมีช่วงที่สามารถปรับได้น้อยทำให้ระบบมีสมรรถนะการควบคุมต่ำ อีกแนวทางคือการใช้ตัวควบคุม 2 ตัว โดยตัวควบคุมตัวแรกใช้สำหรับควบคุมช่วงภาระบางส่วน ขณะที่ตัวควบคุมตัวที่สองใช้สำหรับควบคุมช่วงภาระเต็ม แล้วอาศัยการเปลี่ยนโหมดการควบคุมระหว่างตัวควบคุมทั้งสองเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลง แนวทางนี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมและให้สมรรถนะการควบคุมสูง (Inthamoussou et al., 2014) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบตัวควบคุมตามแนวทางที่สอง

การควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นงานที่ทำหายมาก เพราะความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นอกจากนี้พฤติกรรมของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากอีกด้วย มีงานวิจัยมากมายศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมระบบดังกล่าวโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) พบว่าสามารถควบคุมระบบดังกล่าวได้ แต่สมรรถนะการควบคุมยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ด้วยเหตุนี้ การควบคุมแบบอาศัยสมการแบบจำลอง (model-based control) ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อปรับปรุงสมรรถนะการควบคุม มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ตัวควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear controller) (Feng et al., 2008), (Yilmaz and Özer, 2009) ถึงแม้ว่าการควบคุมดังกล่าวจะให้สมรรถนะการควบคุมที่น่าพอใจ แต่พบว่าการควบคุมดังกล่าวมีภาระการคำนวณค่อนข้างมากทำให้ต้องใช้ระยะเวลาการคำนวณนาน ในบางครั้งพบว่าระยะเวลาการคำนวณมากกว่าระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง (sampling time) ทำให้ตัวควบคุมดังกล่าวไม่สามารถดำเนินการจริงได้ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว สมการแบบจำลองแบบเชิงเส้นถูกเสนอขึ้นมาเพื่อที่ว่าคำนวณสามารถทำได้ง่ายมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม สมการแบบจำลองแบบเชิงเส้นทั่วไปมีความไม่แม่นยำเมื่อนำมาใช้กับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงๆ ดังนั้นสมการแบบจำลองเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying model; LPV model) จึงได้รับความสนใจเพื่อที่จะจัดการกับระบบดังกล่าว

แบบจำลองระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถสร้างได้จากสมการสมดุลภายในระบบขับเคลื่อน (drive-train system) (Sloth et al., 2011) อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านั้นต้องการค่าพารามิเตอร์มากมาย อาทิเช่น ความเฉื่อยของโรเตอร์ (rotor inertia; J_r) ความเฉื่อยของตัวกำเนิด (generator inertia; J_g) สัมประสิทธิ์ความแข็งของเพลลา (shaft stiffness coefficient; $K_{s,s}$) เป็นต้น การทราบค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์เหล่านั้นมีความยากเป็นอย่างมาก ทำให้สมการแบบจำลองที่ได้จากทฤษฎีดังกล่าวมีความผิดพลาด (model mismatch) ค่อนข้างมาก ดังนั้นการสร้างสมการแบบจำลองจากข้อมูลการทดลอง (model identification) จึงถูกนำมาใช้กับงานวิจัยนี้ ด้วยข้อดีของมันคือไม่มีความจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Robust Model Predictive Control; RMPC) สำหรับสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying; LPV) เป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพอย่างมากและถูกนำไปใช้ในหลายๆกระบวนการ เพราะสามารถรับประกันเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่แน่นอนได้ (uncertainty) อัลกอริทึมของ RMPC สำหรับ LPV เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาออปติไมเซชันแบบคอนเวกซ์ (convex optimization problem) ที่มีข้อจำกัดเป็นอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequality; LMI) (Kothare et al., 1996) อย่างไรก็ตาม RMPC สำหรับ LPV ชนิดออนไลน์ต้องการเวลาในการคำนวณนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบที่มีมุมของความไม่แน่นอน (uncertainty vertice) มากๆ ดังนั้น RMPC สำหรับ LPV ชนิดออฟไลน์จึงมีความจำเป็นที่จะถูกนำมาใช้ เนื่องจากมันสามารถลดภาระของการคำนวณลงได้ (Bumroongsri and Kheawhom, 2012)

งานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ส่วนแรกคือการสร้างสมการแบบจำลองสำหรับระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการสร้างสมการแบบจำลองเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรจากข้อมูลการทดลอง ซึ่งอาศัยผลการตอบสนองแบบสเต็ป (step response) ณ จุดดำเนินการ (operating point) ต่างๆ ส่วนที่สองคือการควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า ตัวควบคุมที่ถูกเลือกคือ RMPC สำหรับ LPV ชนิดออฟไลน์ โดยตัวควบคุมจะถูกออกแบบสำหรับช่วงภาระบางส่วนและช่วงภาระเต็มแยกกัน ส่วนสุดท้ายคือ เมื่อผลการควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองเป็นที่น่าพอใจจึงนำตัวควบคุมทั้งสองมาดำเนินการควบคู่กัน โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนโหมดระหว่างตัวควบคุมทั้งสองตัวเพื่อที่จะทำให้การควบคุมทั้งระบบมีประสิทธิภาพการควบคุมสูงและมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสร้างสมการแบบจำลองในรูปแบบสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying; LPV) เพื่อเป็นตัวแทนระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยผลตอบสนองแบบสเต็ป (step response)
2. เพื่อศึกษาสมรรถนะของการควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน ภายใต้สมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรที่สร้างขึ้น
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนโหมดการควบคุมระหว่างการควบคุมทอร์ค (torque control) และการควบคุมมุมใบพัด (pitch control)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าที่ศึกษาคือ กังหันลมชนิดความเร็วผันแปรได้ (variable speed wind turbine) ซึ่งถูกใช้ในโครงการ National Renewable Energy Laboratory (NREL) ที่มีชื่อว่า AWT-27 (NREL, 1998)
2. ศึกษาการควบคุมทั้งช่วงภาระบางส่วน (partial load regime) ช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition regime) และช่วงภาระเต็ม (full load regime) ของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า
3. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษาคือโปรแกรม MATLAB2013a, Simulink และเครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์ (Singh et al., 2014)
4. ข้อมูลความเร็วลมที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถูกทำนายโดยใช้สมการแบบจำลองของ Nanayakkara et al. (1997) และ Østergaard (2007)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าที่ศึกษาให้มีสมรรถนะในการควบคุมสูงสุด เพื่อที่จะได้รับประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดและยืดอายุการใช้งานของระบบกังหันลมดังกล่าว

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะเป็นการปูความรู้พื้นฐานที่จำเป็นให้กับผู้อ่าน เนื้อหาประกอบไปด้วย ข้อมูลเกี่ยวกับระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า, ข้อมูลเกี่ยวกับสมการแบบจำลองเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร, วิธีการสร้างสมการแบบจำลอง, และการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

2.1 ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า (wind turbine system) เป็นระบบหนึ่งที่สำคัญหลักการเปลี่ยนพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลมเป็นพลังงานกลเนื่องจากการหมุนของโรเตอร์ หลังจากนั้นพลังงานกลดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับขนาดของกังหันลม นอกจากนี้ยังขึ้นกับความเร็วลมด้วย ส่วนมากความเร็วลมต้องไม่ต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจึงจะสามารถทำงานได้ โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมเป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถเก็บพลังงานดังกล่าวไว้ในแบตเตอรี่ได้ ขณะที่เครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนมากมักใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นการนำไฟฟ้างดังกล่าวไปใช้จะต้องผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้า (inverter) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเสียก่อน (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 การนำพลังงานไฟฟ้าจากระบบกังหันลมไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า

ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีหลายประเภท แต่ประเภทที่นิยมใช้มากเชิงพาณิชย์คือระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดความเร็วผันแปรได้ (variable speed wind turbine system) เพราะมันสามารถควบคุมกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดี องค์ประกอบหลักของระบบกังหันลม (รูปที่ 2.2) ประกอบด้วย

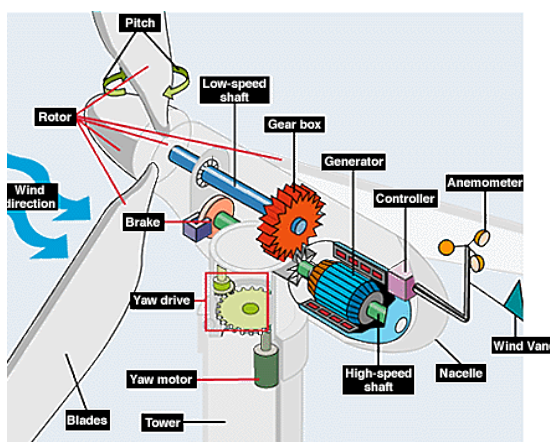
1) ระบบใบพัด ประกอบด้วย ใบพัด (blade) ทำหน้าที่เป็นตัวรับลม และตัวปรับมุมใบพัด (pitch actuator) สามารถปรับมุมใบพัด (pitch angle) ทำให้พื้นที่รับลมมากขึ้นหรือน้อยลงได้ตามต้องการ เพื่อที่จะควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้เหมาะสม โดยส่วนมากอัตราการเปลี่ยนมุมใบพัดมักมีค่าระหว่าง 3 ถึง 10 องศาต่อวินาที

2) ระบบขับเคลื่อน (drive-train system) ประกอบด้วย แกนโรเตอร์ (rotor shaft หรือ low-speed shaft), หีบห่อรอบกำลัง (gear box) และแกนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator shaft หรือ high-speed shaft) โดยหลักการทำงานของระบบนี้คือ เมื่อมีลมกระทบใบพัดส่งผลให้โรเตอร์หมุน เกิดการทดรอบการหมุนที่หีบห่อรอบกำลัง จากนั้นแกนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนรอบขดลวดเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ ณ เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าสามารถปรับเปลี่ยนทอร์คเพื่อที่จะควบคุมความเร็วโรเตอร์ได้

3) อุปกรณ์วัดความเร็วลม (anemometer) และทิศทางการลม (wind vane) เป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างมากเนื่องจากความเร็วลมและทิศทางการลมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์วัดความเร็วลมส่วนมากมักขาดความแม่นยำ เพื่อที่จะทราบความเร็วลมที่แน่ชัดจึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งตัวทำนายความเร็วลม (Nanayakkara et al., 1997), (Bhowmik and Spee, 1998), (Østergaard et al., 2007)

4) ระบบแกนคอกหมุน (yaw system) ทำหน้าที่หมุนแกนคอกกังหันลมเพื่อหันแกนโรเตอร์ให้ขนานกับทิศทางการลม เพื่อที่ว่ากังหันลมจะมีพื้นที่รับลมมากที่สุด

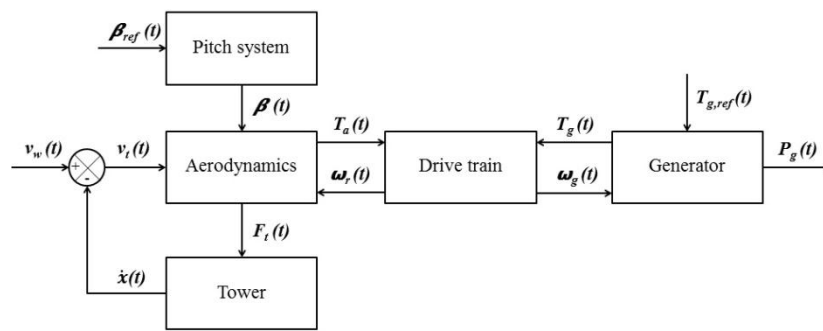
5) โครงสร้างเสา (tower) ทำหน้าที่ยึดติดระบบกังหันลมทั้งหมดให้สูงจากพื้น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางที่อาจปิดบังทางผ่านของลม



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

จากองค์ประกอบทั้งหมดที่กล่าวข้างต้น ตัวแปรที่สามารถถูกปรับค่าได้อย่างอิสระหรือตัวแปรปรับ (manipulated variable) ได้แก่ เจนเนอเรเตอร์ทอร์ค (generator torque), มุมใบพัด (pitch angle) และทิศทางแกนคอคหมุน (yaw direction) ซึ่งตัวแปรปรับเหล่านี้จะถูกกล่าวในหัวข้อต่อไป

ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยมากมายศึกษาเกี่ยวกับสมการแบบจำลองของระบบดังกล่าว (Sloth et al., 2011) โดยสามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.3 สมการแบบจำลองประกอบไปด้วยสมการย่อยๆ ดังนี้



รูปที่ 2.3 แผนผังโครงสร้างสมการแบบจำลองของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

1) สมการแอโรไดนามิก เกี่ยวกับการคำนวณแอโรไดนามิกทอร์คเมื่อมีลมความเร็วเท่ากับ V ผ่านเข้ามา (สมการที่ 2.1) โดยทอร์คดังกล่าวจะถูกส่งไปยังโรเตอร์ส่งผลให้โรเตอร์เกิดการหมุน นอกจากนี้แรงกระทำที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างเสาของกังหันลมก็สามารถถูกคำนวณได้เช่นกัน (สมการที่ 2.2) แรงกระทำดังกล่าวทำให้โครงสร้างเสากเกิดการสั่นไหวได้

$$T_a = \frac{1}{2\omega_r} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_r^3 \quad (2.1)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_r^2 \quad (2.2)$$

2) สมการระบบขับเคลื่อน ประกอบไปด้วยเพลาลูกความเร็วต่ำ (low-speed shaft), เพลาลูกความเร็วสูง (high-speed shaft) เชื่อมต่อกันผ่านห้องทดรอบกำลัง (gear box) โดยทอร์คที่ได้รับจากสมการแอโรไดนามิก รวมทั้งทอร์คจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะคำนวณความเร็วโรเตอร์และความเร็วเจนเนอเรเตอร์ ดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.5

$$J_r \dot{\omega}_r(t) = T_a(t) + \frac{B_{ls}}{N_g} \omega_g(t) - K_{ls} \theta(t) - (B_{ls} - B_r) \omega_r(t) \quad [\text{Nm}] \quad (2.3)$$

$$J_g \dot{\omega}_g(t) = \frac{K_{ls}}{N_g} \theta(t) + \frac{B_{ls}}{N_g} \omega_r(t) - \left(\frac{B_{ls}}{N_g^2} + B_g \right) \omega_g(t) - T_g(t) \quad [\text{Nm}] \quad (2.4)$$

$$\dot{\theta}(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad [\text{rad/s}] \quad (2.5)$$

3) สมการระบบใบพัด การทำงานของตัวปรับมุมใบพัดคือ รับสัญญาณมุมที่ต้องการปรับ (reference pitch angle) จากนั้นระบบไฮดรอลิกทำงานเพื่อปรับมุมให้เท่ากับสัญญาณที่รับมา โดยพฤติกรรมของตัวปรับมุมใบพัดถูกแทนด้วยสมการอันดับสอง ดังสมการที่ 2.6 นอกจากนี้ การปรับมุมใบพัดยังมีข้อจำกัดสำคัญสำคัญ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนมุมใบพัด ($\dot{\beta}$) และช่วงของมุมใบพัดที่สามารถปรับได้

$$\ddot{\beta}(t) = -2\theta\omega_n\dot{\beta}(t) - \omega_n^2\beta(t) + \omega_n^2\beta_{ref}(t - t_d) \quad [^\circ/s^2] \quad (2.6)$$

4) สมการเจนเนอเรเตอร์ หน้าที่หลักคือผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นไปตามสมการที่ 2.7 นอกจากนี้เจนเนอเรเตอร์ยังทำหน้าที่ควบคุมปริมาณทอร์คที่ส่งไปยังเพลาความเร็วสูงด้วย โดยพฤติกรรมเป็นสมการอันดับหนึ่งดังสมการที่ 2.8

$$P_g(t) = \eta_g\omega_g(t) T_g(t) \quad [W] \quad (2.7)$$

$$\dot{T}_g(t) = -\frac{1}{\tau_g} T_g(t) + \frac{1}{\tau_g} T_{g,ref}(t - t_{g,d}) \quad [Nm/s] \quad (2.8)$$

5) สมการโครงสร้างเสา เนื่องจากลมที่มาปะทะกับใบพัดของกังหันลมทำให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างเสา ส่งผลให้เสาเกิดการสั่นไหว (สมการที่ 2.9) การสั่นไหวของเสายังทำให้ความเร็วลมที่ปะทะกับใบพัดเปลี่ยนไปจากความเร็วลมจริงดังสมการที่ 2.10

$$M_t\ddot{x}_t(t) = F_{th}(t) - B_t\dot{x}_t(t) - K_t x_t(t) \quad [N] \quad (2.9)$$

$$V_t(t) = V_w(t) - \dot{x}_t(t) \quad [m/s] \quad (2.10)$$

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้นำสมการเหล่านี้มาใช้ในการจำลองกระบวนการ แต่เลือกใช้เครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์ (FAST; Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) ซึ่งถูกพัฒนาโดยโครงการ National Renewable Energy Laboratory (NREL) ดังรูปที่ 2.4 แบบจำลองของฟาสต์ถูกพัฒนาภายใต้หลักการทางวิศวกรรมขั้นสูง อย่างไรก็ตามมันถูกทำให้ง่ายขึ้นโดยการตั้งสมมติฐานอย่างเหมาะสม เกิดจากการรวมสมการแบบจำลองต่างๆ ไว้มากมาย ได้แก่ สมการพลวัตของอากาศ (aero) สมการพลวัตของน้ำ (hydro) สมการระบบกระแสไฟฟ้า (servo) และสมการพลวัตของโครงสร้าง (elastic) สมการเหล่านี้ถูกรวบรวมเพื่อเป็นเครื่องมือจำลองกระบวนการในโดเมนเวลา เรียกว่า “aero-hydro-servo-elastic” โดยแต่ละสมการมีหลักการการทำงาน ดังนี้

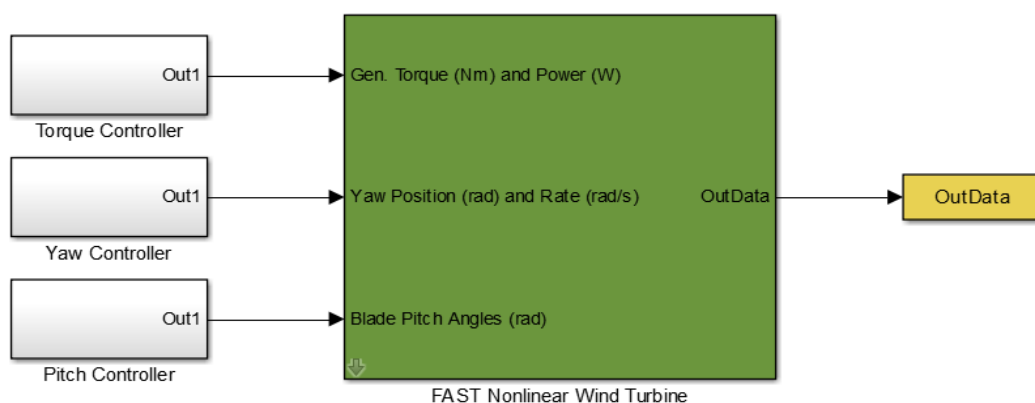
1) สมการพลวัตของอากาศ (aerodynamic models) ใช้ข้อมูลความเร็วลมที่ป้อนเข้ามาในการสมการเพื่อคำนวณหาปริมาณโหลดที่กระทำต่อใบพัดซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอากาศ โดยมีการคำนึงถึง

ผลกระทบของอากาศที่ไหลวนด้านหลังใบพัด (rotor-wake effects) และภาวะแยกตัวของอากาศ (stall effect)

2) สมการพลวัตของน้ำ (hydrodynamic models) เป็นการพิจารณาถึงโครงสร้างกังหันลมที่ตั้งอยู่บริเวณนอกชายฝั่ง โดยให้ความสำคัญกับคลื่นในทะเลที่เกิดขึ้น คำนึงถึงผลของสถิตยศาสตร์ของน้ำ (hydrostatic) การแผ่กระจายของคลื่นน้ำ (radiation) การเลี้ยวเบนของคลื่นน้ำ (diffraction) และโพลดที่เกิดขึ้นจากความหนืดของน้ำ

3) สมการระบบกระแสไฟฟ้า (electric system models) เป็นการจำลองกระบวนการควบคุมทางด้านไฟฟ้าซึ่งเกี่ยวข้องกับเรื่องของตรรกศาสตร์การควบคุม การรับ-ส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) กับอุปกรณ์ขับเคลื่อน (actuator) ของตัวปรับมุมใบพัด ตัวปรับเจนเนอเรเตอร์เทอร์ค และตัวปรับทิศทางแกนคอกังหันลม รวมถึงระบบการกำเนิดกระแสไฟฟ้าและการแปลงกระแสไฟฟ้า

4) สมการพลวัตของโครงสร้าง (structural-dynamics models) เป็นการคำนวณผลที่เกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่น (elasticity) ขององค์ประกอบต่างๆ อาทิ โรเตอร์ ระบบขับเคลื่อน และโครงสร้างเสริม รวมถึงความยืดหยุ่นระหว่างรอยต่อขององค์ประกอบต่างๆ ด้วย



รูปที่ 2.4 เครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์

เครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์สามารถใช้วิเคราะห์ระบบกังหันลมที่มีลักษณะต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นกังหันลมชนิด 2 หรือ 3 ใบพัด รวมถึงการจำลองกระบวนการบนพื้นดิน (fixed-bottom) หรือบริเวณนอกชายฝั่ง (floating substructures) จากรูปที่ 2.4 กล่องสีเขียวแทนระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่คำนวณค่าเอาต์พุตเมื่อมีค่าอินพุตเข้ามาสู่ระบบนี้ สำหรับตัวแปรอินพุตประกอบด้วยสามส่วนหลักๆคือ ตัวควบคุมทอร์ค (torque controller), ตัวควบคุมพิช (pitch controller) และตัวควบคุมแกนคอกังหันลม (yaw controller) ซึ่งก็คือตัวแปรปรับสามตัวที่ได้กล่าว

ไปในข้างต้น ขณะที่ตัวแปรเอาต์พุตมีหลากหลายให้เลือก ตัวอย่างเช่น ความเร็วโรเตอร์ ความเร็วเจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น ฟาสต์ถูกพัฒนามาจากชุดสมการมากมายที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากจึงถือได้ว่าเครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์มีความถูกต้องอย่างมาก โดยในงานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานที่ว่าฟาสต์เป็นระบบจริงปราศจากความคลาดเคลื่อน

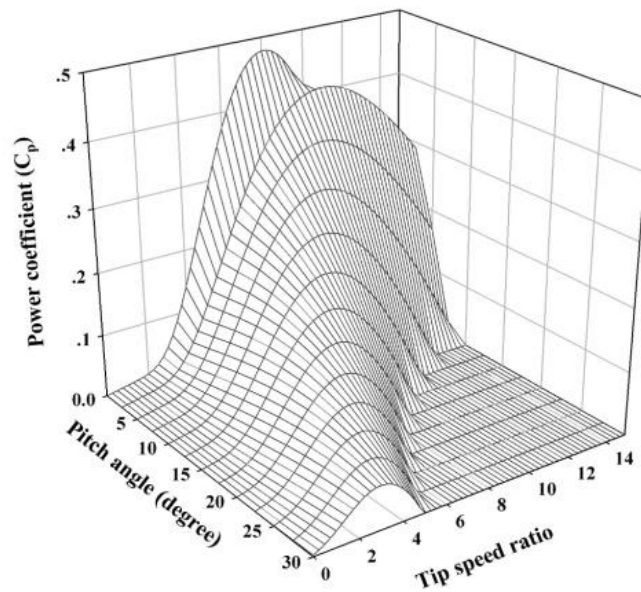
โดยปกติแล้วการดำเนินการของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ภาระบางส่วน (partial load regime) และภาระเต็ม (full load regime) โดยที่ช่วงภาระบางส่วนหมายถึง ช่วงที่ความเร็วลมต่ำซึ่งไม่เพียงพอต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามค่าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (rated power; P_r) ขณะที่ช่วงภาระเต็ม เป็นช่วงที่ความเร็วลมสูงเพียงพอต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด ความเร็วลมที่แบ่งสองช่วงดำเนินการออกจากกันเรียกว่า ความเร็วลมที่กำหนด (rated wind speed; V_r) ช่วงดำเนินการทั้งสองมีรูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน

ในช่วงภาระบางส่วนมีจุดประสงค์หลักของการควบคุมคือต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด ขณะที่ลมไหลผ่านมายังใบพัดของกังหันลม พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และแอร์โตนามิคทอร์คสามารถถูกคำนวณจากสมการที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ จากสมการที่ 2.11 เห็นได้ว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นอากาศ (ρ), รัศมีของโรเตอร์ (R), สัมประสิทธิ์พลังงาน (power coefficient; C_p) และความเร็วลม (V) เนื่องจาก ρ และ r เป็นค่าคงที่ และ V เป็นค่าที่ไม่สามารถกำหนดได้ ดังนั้นหากต้องการพลังงานสูงสุดสามารถทำได้โดยเลือก C_p ให้มีค่าสูงสุด โดยที่ C_p มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความเร็ว ปลายใบพัด (tip speed ratio; λ) และมุมใบพัด (β) ตามรูปที่ 2.5 พบว่า C_p มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.48 ณ λ เท่ากับ 8.1 และ β เท่ากับ 0 องศา ดังนั้นความเร็วโรเตอร์ที่เหมาะสม (optimal rotor speed) สามารถถูกคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.13 ซึ่งค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม สรุปได้ว่า การควบคุมในช่วงภาระบางส่วนกระทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าเจนเนอเรเตอร์ทอร์คเพื่อควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้อยู่ที่ค่าที่เหมาะสมซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ช่วงนี้ถูกเรียกว่า การควบคุมทอร์ค (torque control)

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (2.11)$$

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 C_p(\lambda, \beta) V^2 \quad (2.12)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{V} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์พลังงาน

สำหรับช่วงภาระเต็ม เป้าหมายหลักคือการรักษาความปลอดภัยให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) โดยการควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้คงที่ที่ค่าที่กำหนด (rated rotor speed) เพราะหากความเร็วโรเตอร์สูงเกินกว่าค่าดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ การควบคุมในช่วงนี้กระทำได้โดยกำหนดให้มุมใบพัดเป็นตัวแปรปรับ ขณะที่ความเร็วโรเตอร์เป็นตัวแปรควบคุมโดยมีเซตพอยต์อยู่ที่ค่าที่กำหนด กล่าวคือเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น มุมใบพัดจะถูกปรับให้มีมุมมากขึ้นเพื่อที่จะลดพื้นที่รับลมให้น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วโรเตอร์ยังคงที่ได้อยู่ได้ การควบคุมในช่วงภาระเต็มนี้ถูกเรียกว่า การควบคุมพิช (pitch control)

2.2 สมการแบบจำลองเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying)

การควบคุมกระบวนการขึ้นสูงส่วนมากมักต้องการสมการแบบจำลองที่สามารถเป็นตัวแทนของระบบนั้นๆ ได้ เพื่อให้เข้าใจง่ายและง่ายต่อการคำนวณ สมการแบบจำลองมักถูกจัดอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นที่เรียกว่า สมการสแตต-สเปซ (state space model) ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15 เมื่อ x คือตัวแปรสแตต, u คือตัวแปรปรับ, y คือตัวแปรเอาต์พุต และ A , B , C , และ D เป็นเมทริกซ์ของระบบ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.14)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.15)$$

อย่างไรก็ตาม ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เมทริกซ์เหล่านั้นจะไม่ใช่ค่าคงที่ กล่าวคือ เมทริกซ์เหล่านั้นมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรสแตตหรือพารามิเตอร์บางตัว ดังสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$\dot{x}(t) = A(p)x(t) + B(p)u(t) \quad (2.16)$$

$$y(t) = C(p)x(t) + D(p)u(t) \quad (2.17)$$

2.3 การสร้างสมการแบบจำลอง

จากที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.2 สมการแบบจำลองเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมกระบวนการด้วยเทคนิคขั้นสูง ดังนั้นการสร้างสมการแบบจำลองจึงเป็นความสำคัญเช่นเดียวกัน วิธีการสร้างสมการแบบจำลองถูกแบ่งเป็นสองวิธีหลักๆคือ 1) วิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical method) ส่วนมากเกี่ยวกับการใช้ทฤษฎีและการสร้างสมการสมมูลต่างๆ เช่น สมดุลมวล สมดุลพลังงาน เป็นต้น และ 2) วิธีเชิงประจักษ์ (empirical method) เกี่ยวข้องกับการนำข้อมูลจากการทดลองมาใช้ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีที่สองเท่านั้น

วิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมมากเชิงคอนโทรลคือ การใช้ผลตอบสนองแบบสเต็ป (step response) มีหลักการคือ ขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ทำการรบกวนระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุตแบบสเต็ป หลังจากนั้นวัดสัญญาณตัวแปรเอาต์พุต สำหรับระบบโดยทั่วไปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่วัดได้มีลักษณะพฤติกรรมเป็นอันดับหนึ่ง (รูปที่ 2.6) จากผลตอบสนองดังกล่าว เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของระบบนี้โดยการใช้วิธีการเชิงกราฟ (graphical method) ค่าพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย

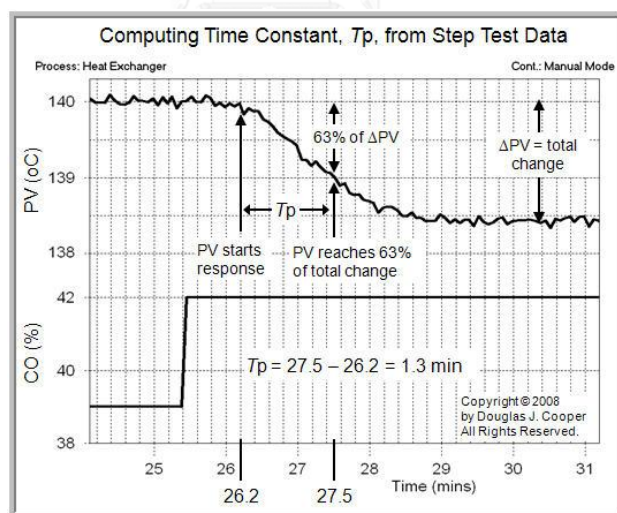
1) อัตราขยายของกระบวนการ (process gain; K_p) เป็นสัดส่วนระหว่างตัวแปรเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไป ณ สภาวะคงตัวหารด้วยตัวแปรอินพุตที่เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ค่าอัตราขยายสามารถเป็นได้ทั้งเครื่องหมายบวกและลบขึ้นอยู่กับผลตอบสนองของกระบวนการ

2) ไทม์คอนสแตนต์ (time constant; τ) โดยปกติแล้วกระบวนการทั่วไปถูกกำหนดว่าเมื่อระบบที่อยู่ในสภาวะคงตัวถูกรบกวนแบบสเต็ประบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้งโดยใช้ระยะเวลา 5 เท่าของไทม์คอนสแตนต์ (ดังตารางที่ 2.1) ดังนั้นค่าไทม์คอนสแตนต์สามารถหาได้จากเวลาที่ตัวแปรเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป 63.21 เปอร์เซ็นต์ ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของไทม์คอนสแตนต์กับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง

เวลา	$-t/\tau$	$e^{-t/\tau}$	$1 - e^{-t/\tau}$
0	0	1.0000	0.0000
1 τ	1	0.3679	0.6321
2 τ	2	0.1353	0.8647
3 τ	3	0.0498	0.9502
4 τ	4	0.0183	0.9817
5 τ	5	0.0067	0.9933

3) เดดไทม์ (dead time; θ) คือระยะเวลาที่ตัวแปรเอาต์พุตยังคงไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุตแบบสแต็ป



รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองแบบสแต็ป

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งสามแล้วสามารถนำไปแทนลงในทรานสเฟอร์ฟังก์ชันสำหรับพฤติกรรมอันดับหนึ่งได้ ดังสมการที่ 2.18 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังกล่าวบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบ นอกจากนี้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนี้สามารถถูกแปลงให้อยู่ในรูปสมการสเตต-สเปซได้ ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15 โดยใช้สมบัติของการแปลงลาปลาซ (Laplace transformation)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2.18)$$

สำหรับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นผลตอบสนองที่ตำแหน่งต่างๆจะมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแทนด้วยสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (Linear Parameter Varying; LPV) ได้ วิธีการหนึ่งสำหรับการสร้างสมการแอลพีวีคือการรวบรวมสมการสเตต-สเปซที่ตำแหน่งดำเนินการต่างๆ จากนั้นรวมข้อมูลเหล่านั้นด้วยการประมาณค่าในช่วง (interpolation) จะได้สมการแอลพีวีดังสมการที่ 2.16 และ 2.17

2.4 การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control; MPC) เป็นการควบคุมขั้นสูง มักถูกนำไปใช้ควบคุมกับหลากหลายระบบ เนื่องจากมีสมรรถนะการควบคุมสูง นอกจากนี้การควบคุมนี้ยังมีข้อดีคือสามารถรับประกันเสถียรภาพของระบบได้ การคำนวณของการควบคุมนี้เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาคออปติไมเซชัน ตามสมการที่ 2.19 ถึง 2.23 โดยที่สมการที่ 2.19 เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งต้องการทำให้ฟังก์ชันดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวแปรสเตตกับเซตพอยต์และการใช้ตัวแปรปรับมีค่าน้อยที่สุด โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการตามสมการที่ 2.20 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรปรับและตัวแปรสเตตดังสมการที่ 2.21 และ 2.22 และส่วนสุดท้าย สมการที่ 2.23 หมายถึงการกำหนดว่าตัวแปรสเตตต้องเข้าสู่เซตพอยต์เสมอ เป็นตัวบ่งบอกการรับประกันเสถียรภาพของระบบนั่นเอง ในแต่ละช่วงเวลาเก็บตัวอย่าง (sampling time) ใดๆ ปัญหาออปติไมเซชันดังกล่าวจะถูกแก้เพื่อที่จะคำนวณค่าชุดของตัวแปรปรับและตัวแปรสเตต (รูปที่ 2.7) อย่างไรก็ตาม มีเพียงตัวแปรปรับค่าแรกเท่านั้นที่ถูกนำไปใช้สำหรับดำเนินการควบคุมระบบ ส่วนนี้จึงเป็นจุดที่แตกต่างไปจากการควบคุมแบบออปติมอล (optimal control) ซึ่งจะนำตัวแปรปรับทุกค่าที่คำนวณได้ไปใช้ดำเนินการควบคุมทั้งหมด ส่งผลให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่านั่นเอง

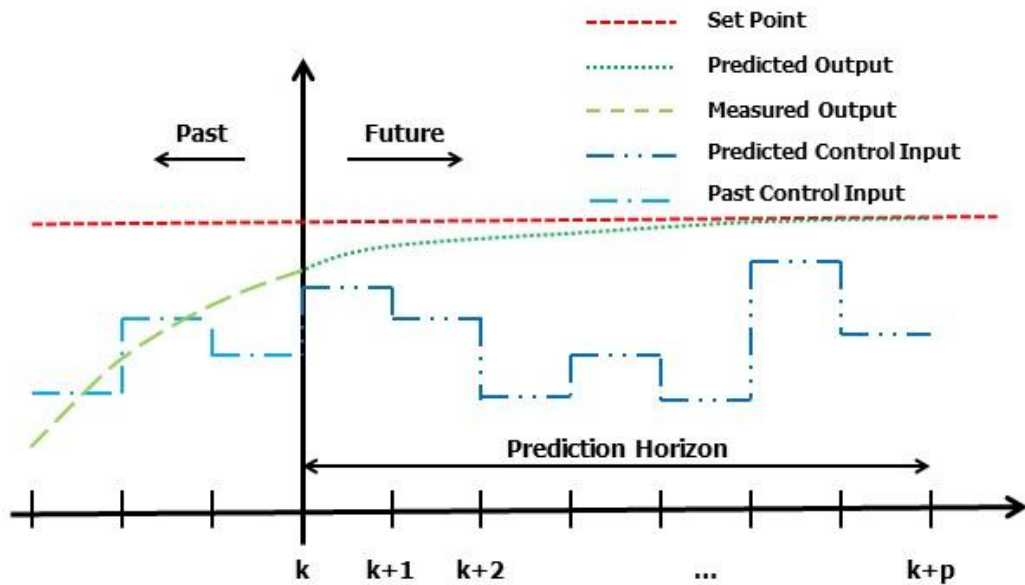
$$\min \int_t^{t+t_f} [W_1(X - X^{sp})^2 + W_2(U)^2] dt \quad (2.19)$$

$$\text{s. t. } \dot{X} = A X(t) + B U(t) \quad (2.20)$$

$$U_{\min} < U(t) < U_{\max} \quad (2.21)$$

$$X_{\min} < X(t) < X_{\max} \quad (2.22)$$

$$X(t + t_f) = X^{sp} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.7 ลักษณะผลการตอบสนองสำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

อย่างไรก็ตาม การควบคุมดังกล่าวไม่สามารถรับประกันเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่แน่นอน (uncertainty) ได้ จึงมีการพัฒนาการควบคุมดังกล่าวขึ้นเรียกว่า การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Robust Model Predictive Control; RMPC) (Kothare et al., 1996) ลักษณะโจทย์ปัญหาออปติไมเซชันของการควบคุมชนิดนี้อยู่ในรูปอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (Linear Matrix Inequality; LMI) ดังสมการที่ 2.24 ถึง 2.28 โดยที่ Q เป็นโพซิทีฟดีไฟไนท์เมทริกซ์ (positive definite matrix), Θ และ R เป็นเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรสแตตและตัวแปรปรับ ตามลำดับจากการแก้โจทย์ออปติไมเซชันดังกล่าวสามารถคำนวณค่าอัตราขยายของตัวควบคุม (controller gain; K) ได้จาก $K = YQ^{-1}$ และคำนวณค่าตัวแปรอินพุตได้จาก $u_k = Kx_k$

$$\min_{\gamma, Y, Q} \gamma \quad (2.24)$$

$$\text{s. t. } \begin{bmatrix} 1 & * \\ x_k & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ A_1Q + B_1Y & Q & * & * \\ \Theta^{\frac{1}{2}}Q & 0 & \gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}}Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \forall l = 1, 2, \dots, L \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} U & * \\ Y^T & Q \end{bmatrix} \geq 0, U = u_{d, \max}^2 \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} X & * \\ (A_1Q + B_1Y)^T C_1^T & Q \end{bmatrix} \geq 0, X = y_{d, \max}^2, \forall l = 1, 2, \dots, L \quad (2.28)$$

บทที่ 3

ทบทวนวรรณกรรม

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อรวบรวมองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย หัวข้องานวิจัยที่ศึกษาประกอบไปด้วย 1) การควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวมีรูปแบบการควบคุมอย่างไร มีการใช้เทคนิคใดบ้าง 2) การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง แสดงถึงพัฒนาการของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง ตลอดจนข้อดีของมัน และ 3) การประมาณความเร็วลม เพื่อที่จะนำข้อมูลความเร็วลมและวิธีการประมาณความเร็วลมมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้

3.1 การควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

การควบคุมระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าแบ่งเป็นสองช่วงดำเนินการคือ ช่วงภาระบางส่วนและช่วงภาระเต็ม สำหรับช่วงภาระเต็มมักกระทำโดยกำหนดให้มุมใบพัดเป็นตัวแปรปรับขณะที่ความเร็วโรเตอร์เป็นตัวแปรควบคุม Abbas et al. (2011) เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมนี้ จำลองกระบวนการผ่านโปรแกรมแมทแล็บ-ซิมูลิงค์ (MATLAB/Simulink) โดยแทนระบบกังหันลมด้วยบล็อกไดอะแกรมที่ผ่านการทำลิเนียร์ไรเซชันและแทนตัวปรับมุมใบพัด (pitch actuator) ด้วยทรานสเฟอ์ฟังก์ชันอันดับหนึ่ง ตัวควบคุมพีไอดีถูกจูนโดยคำนึงถึงค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ของความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วโรเตอร์จริงและความเร็วโรเตอร์ที่ต้องการ เพื่อที่ว่าสมรรถนะการควบคุมจะมีค่าสูงสุด ทำการจำลองกระบวนการโดยกำหนดความเร็วลมระหว่าง 4.7 ถึง 8.1 เมตรต่อวินาที ต้องการควบคุมความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 47.1 เรเดียนต่อวินาที สามารถปรับมุมของใบพัดได้ระหว่าง 5 ถึง 15 องศา โดยกำหนดตำแหน่งดำเนินการคือ ความเร็วลมเท่ากับ 6.4 เมตรต่อวินาที และมุมใบพัดเท่ากับ 9 องศา พบว่าสามารถควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้เข้าสู่เซตพอยต์ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.4 เรเดียนต่อวินาที

ตัวปรับมุมใบพัด (pitch actuator) เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากสำหรับการควบคุมระบบกังหันลม การเลือกสิ่งนี้เหมาะสมจะทำให้สามารถควบคุมระบบกังหันลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ Vishal et al. (2013) ศึกษาเกี่ยวกับการจูนและการตั้งค่าตัวปรับมุมใบพัด คำนึงถึงการควบคุมให้ค่ามุมใบพัดจริง (actual pitch angle; β) เข้าสู่ค่ามุมใบพัดอ้างอิง (reference pitch angle; β_{ref}) โดยเร็วที่สุด ผลจากการศึกษาการตั้งค่าอัตราการเปลี่ยนมุมใบพัด (pitching speed) ที่อัตรา 5, 8 และ 15 องศาต่อหน่วยเวลา พบว่าที่อัตรา 8 องศาต่อหน่วยเวลา ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด เนื่องจากถ้าตั้งค่าให้ช้าเกินไปทำให้ไม่สามารถติดตามเซตพอยต์ได้ทัน ในขณะที่ถ้าตั้งค่าเร็วเกินไปทำให้เกิดแรง

กระทำบนใบพัดอย่างมาก นอกจากนี้ผลการจูนตัวควบคุมพีไอดีพบว่าการใช้โหมดพีไอ ($K_p=2$, $K_i=0.01$ และ $K_d=0$) ให้ผลตอบสนองดีกว่าการใช้โหมดพีไอดี

เนื่องจากระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก Bianchi et al. (2005) ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมระบบดังกล่าวโดยใช้เทคนิคอัตราขยายสเก็ดดูลิง (gain scheduling) พฤติกรรมของกังหันลมถูกแทนด้วยสมการแบบจำลองเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (LPV model) โดยการทำให้เนียร์โรเซชันกับสมการแบบจำลองพลวัต (dynamic model) ของกังหันลม จากนั้นทำการแก้ปัญหาค่าจำกัดแบบอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequality; LMI) ที่ตำแหน่งดำเนินการต่างๆ เพื่อที่จะรวบรวมค่าอัตราขยายสำหรับใช้ในตัวควบคุมแอลพีวีและทำการเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี้ (H^∞) จากการศึกษาการควบคุมแบบติดตามเซตพอยต์ (set-point tracking) เมื่อความเร็วลมมีความเปลี่ยนแปลงพบว่า การควบคุมแบบแอลพีวีมีสมรรถนะที่ดีกว่า กล่าวคือมีความคลาดเคลื่อนของความเร็วโรเตอร์น้อยกว่า อีกทั้งยังสามารถลดการแกว่งของทอร์คได้มากกว่าอีกด้วย

การควบคุมระบบกังหันลมตลอดช่วงภาระบางส่วนและภาระเต็ม ส่วนมากมักกระทำโดยการออกแบบตัวควบคุมสองตัว โดยตัวควบคุมแรกใช้ควบคุมช่วงภาระบางส่วนขณะที่อีกตัวควบคุมหนึ่งใช้ควบคุมช่วงภาระเต็ม หลังจากนั้นอาศัยหลักการเปลี่ยนโหมดการควบคุมระหว่างทั้งสองโหมดดังกล่าวเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนโหมดการควบคุมก่อให้เกิดผลตอบสนองที่ไม่ต้องการ จึงมีความจำเป็นต้องมีการติดตั้งตัวชดเชยแอนตี้ไวน์ดอัป (anti-windup compensation) เพื่อที่จะชดเชยผลตอบสนองที่ไม่ต้องการ Inthamoussou et al. (2014) ออกแบบตัวชดเชยแอนตี้ไวน์ดอัป ซึ่งหลักการทำงานของมันเป็นคือการชดเชยค่าความเร็วโรเตอร์ก่อนเข้าตัวควบคุมพีชและชดเชยค่ามุมใบพัดหลังจากออกจากตัวควบคุมพีช โดยตัวควบคุมพีชเป็นแบบเอช-อินฟินิตี้ (H^∞) เปรียบเทียบผลการควบคุมกับตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ผลการจำลองกระบวนการโดยใช้ลมที่มีลักษณะแบบลมเพิ่มขึ้น (wind rise) ตามข้อมูลมาตรฐาน IEC 61400-1 ซึ่งครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงตั้งช่วงภาระบางส่วนจนกระทั่งช่วงพูลโหลด ผลจากการจำลองกระบวนการพบว่า การควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี้ที่มีตัวชดเชยแอนตี้ไวน์ดอัปมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ โดยมีโอเวอร์ชูต (overshoot) ของความเร็วเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 25.49 และ 32.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.2 การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพมาก แต่ในบางครั้งพบว่ามันมีความทนทาน (robustness) ต่ำ Kothare et al. (1996) จึงได้เสนอการควบคุมใหม่ขึ้นมาคือ การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (robust model predictive control; RMPC) ลักษณะของการคำนวณเกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาออปติไมเซชันที่มีข้อจำกัดแบบอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequality; LMI) การพัฒนาการควบคุมชนิดนี้กระทำบนพื้นฐานของการควบคุมแบบป้อนกลับ (state feedback) นอกจากนี้การคำนวณยังคำนึงถึงข้อจำกัดของตัวแปรสแตต (output constraint) และตัวแปรปรับ (input constraint) อีกด้วย ผลจากการควบคุมด้วยเทคนิคนี้พบว่าสามารถควบคุมระบบที่มีความไม่แน่นอน (uncertainty) ให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ ในขณะที่การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองไม่สามารถควบคุมระบบดังกล่าวให้เข้าสู่เสถียรภาพได้

ปัญหาออปติไมเซชันในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ส่งผลให้การคำนวณแบบออนไลน์ใช้เวลานาน ด้วยเหตุนี้ Wan and Kothare (2003) ได้ทำการศึกษาพัฒนาการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนชนิดออฟไลน์ (offline RMPC) ขึ้น ซึ่งยังคงสามารถรับประกันเสถียรภาพของระบบปิดได้ ภายใต้แนวคิด asymptotically stable invariant ellipsoid มีหลักการคือ การสร้างเซตของค่าอัตราขยายแบบป้อนกลับ (feedback gain) สำหรับตัวแปรสแตต ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยการแก้ปัญหาอสมการเมทริกซ์เชิงเส้น การกระทำดังกล่าวถูกดำเนินการขณะที่ยังไม่เริ่มการควบคุม เมื่อการควบคุมเริ่มขึ้น ค่าอัตราขยายแบบป้อนกลับจะถูกเลือกอย่างเหมาะสมจากเซตข้อมูลที่สร้างไว้ข้างต้น ทำให้การคำนวณแบบออนไลน์ใช้ระยะเวลาลดลงเป็นอย่างมาก ผลจากการควบคุมระบบดังกล่าวแบบต่อเนื่องอุณหภูมิไม่คงที่ (non-isothermal CSTR) พบว่าการควบคุมแบบออฟไลน์ให้สมรรถนะการควบคุมใกล้เคียงกับการควบคุมแบบออนไลน์ ขณะที่ใช้ระยะเวลาการคำนวณน้อยกว่าประมาณ 900 ถึง 1,000 เท่า ด้วยเหตุนี้ ทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนชนิดออฟไลน์มีปัญหาเกี่ยวกับค่าอัตราขยายที่เปลี่ยนแปลงเมื่อตำแหน่งของตัวแปรสแตตเปลี่ยนจากเซตหนึ่งไปยังอีกเซตหนึ่ง ทำให้ค่าอัตราขยายมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ส่งผลให้เกิดความไม่ราบเรียบระหว่างการควบคุม เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว Bumroongsri and Kheawhom (2013) ได้เสนอเทคนิคการประมาณค่าในช่วง (interpolation) เพื่อปรับปรุงค่าอัตราขยายให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยการอินเตอร์โพลระหว่างค่าอัตราขยายในเซตที่เล็กที่สุดที่เสถียรนั้นอยู่กับค่าอัตราขยายเซตถัดไป ผลการทดลองพบว่าสมรรถนะใกล้เคียงกับการควบคุมแบบออนไลน์เป็นอย่างมาก แต่ใช้ระยะเวลาดำเนินการน้อยกว่า

3.3 การประมาณความเร็วลม

ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้มีความยากสำหรับการวัดค่าที่แน่นอนของมัน เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว (Bhowmik and Spee (1998)) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าความเร็วลม โดยกำหนดความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์พลังงาน (power coefficient; C_p) เป็น $C_p = C_{p0} + C_{p1}\lambda + C_{p2}\lambda^2 + \dots + C_{pn}\lambda^n$ จากนั้นแก้สมการ $P_a = \frac{1}{2} \rho C_p(\beta, \lambda) r^5 \frac{\omega^3}{\lambda^3}$ เพื่อหาค่า λ ซึ่งเป็นรากของสมการ โดยใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลข เช่น นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) ซึ่งสามารถนำค่า λ สามารถนำไปคำนวณค่าความเร็วลมได้

นอกจากนี้ Østergaard et al. (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าความเร็วลมเช่นกัน โดยสิ่งสำคัญที่ใช้ในการคำนวณค่าความเร็วลมคือ ความเร็วของโรเตอร์และแอร์ไดนามิกส์ทอร์ค ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้จากสมการสมดุลภายในระบบขับเคลื่อน หลังจากทราบค่าทั้งสองแล้วจึงนำไปประมาณค่าความเร็วลมโดยอาศัยความสัมพันธ์ $\frac{2T_a}{\rho \pi r^5 \omega^2} = \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda^3}$ เนื่องจากเทอมทางด้านซ้ายทราบค่าทั้งหมด นอกจากนี้ค่ามุมของใบพัด (pitch angle; β) ก็สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความเร็ว ปลายใบพัด (tip speed ratio; λ) ได้ โดยใช้ความเป็นโมโนโทน (monotonicity) ของความสัมพันธ์ระหว่าง $C_p(\beta, \lambda) \cdot \lambda^{-3}$ และถูกนำไปคำนวณหาค่าความเร็วลมได้ โดยความเร็วลมที่ถูกประมาณมีความแม่นยำสูงเมื่อ β มีค่ามาก ขณะที่ความแม่นยำลดลงเมื่อ β เข้าใกล้ศูนย์องศา เนื่องจากมีความไม่เป็นโมโนโทน (non-monotonicity)

นอกจากการประมาณความเร็วลมปัจจุบันแล้ว Nanayakkara et al. (1997) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในอนาคต เริ่มต้นโดยการรวบรวมชุดตัวอย่างความเร็วลมในช่วงเวลาต่างๆ โดยกำหนดระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 0.1 วินาที จากนั้นนำชุดตัวอย่างความเร็วลมที่รวบรวมได้มาฟิต (fit model) กับสมการแบบจำลองของเขาคือ $V(t+1) = \sum_{i=1}^p -a(i)V(t-i+1) + \varepsilon(t)$ โดยที่ p คือ อันดับของสมการแบบจำลอง, $a(i)$ คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลอง, และ $\varepsilon(t)$ คือ สัญญาณรบกวนซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ จากการใช้วิธีกำลังสองต่ำที่สุด (least-square method) พบว่าอันดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสมการแบบจำลองคือ อันดับ 27 ซึ่งพารามิเตอร์ $a(1)$ ถึง $a(27)$ ที่ได้คือ -5.93, 15.55, -22.55, 17.43, -3.24, 5.60, 2.97, 1.89, -1.17, -1.16, 0.57, 0.03, 1.44, -1.85, 0.22, 0.63, -0.76, 2.01, -1.72, -3.69, 10.61, -11.95, 7.10, -1.68, -0.54, 0.47 และ -0.10 ตามลำดับ หลังจากนั้นสมการแบบจำลองดังกล่าวถูกตรวจสอบความถูกต้อง (validation) กับข้อมูลลมจากหลายรูปแบบพบว่าข้อมูลที่รับจากสมการแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับข้อมูลจริงเป็นอย่างมาก จึงสรุปได้ว่าสมการแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายความเร็วลมได้

บทที่ 4 ระเบียบวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองกระบวนการโดย ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษาคือโปรแกรม MATLAB2013a, Simulink และเครื่องมือจำลองกระบวนการฟาสต์ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการต่อตัว ทำนายความเร็วลม การต่อระบบการควบคุม รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการศึกษาค้นคว้า

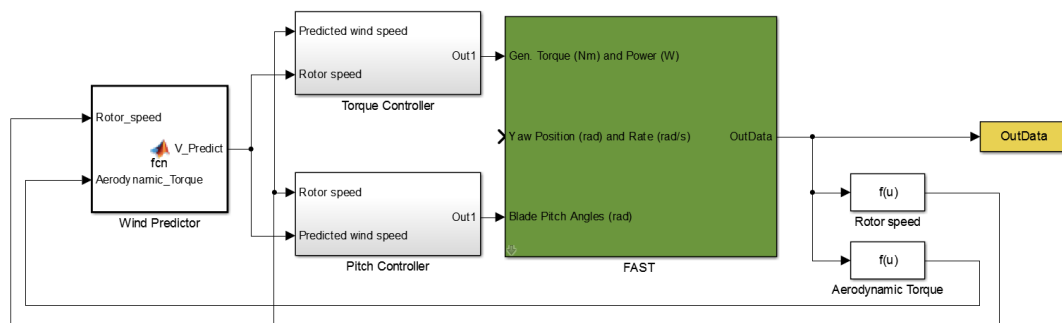
4.1 ความเร็วลมที่ใช้ในการศึกษา

ความเร็วลมที่ถูกพิจารณาในการศึกษาค้นคว้าประกอบไปด้วย 3 ตัว คือ ความเร็วลมจริง ความเร็วลมจากการวัด และความเร็วลมจากการทำนาย

ความเร็วลมจริง ถูกกำหนดขึ้นมาภายใต้พฤติกรรมลมจริงตามผลการวิจัยของ Joffe and Laurila (1988) กล่าวคือ ความเร็วลมมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.4 เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า 5 เมตรต่อวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ $0.08 \times$ ความเร็วลม เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วลมมากกว่า 5 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้ยังคำนึงถึงพฤติกรรมลมกระโชก (gust) และลมยกกระด้าง (rise up) ตามมาตรฐาน IEC 61400-1 และตั้งสมมติฐานว่าทิศทางของลมไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ความเร็วลมจากการวัด เป็นความเร็วลมที่ถูกวัดโดยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ 3 ถ้วย รุ่น SK-7760-00 ซึ่งมีความแม่นยำเท่ากับ ± 0.5 เมตรต่อวินาที สำหรับความเร็วลมต่ำกว่า 10 เมตรต่อวินาที และมีความแม่นยำ ± 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเร็วลมสูงกว่า 10 เมตรต่อวินาที

ความเร็วลมจากการทำนาย ได้รับจากการใช้ตัวทำนายความเร็วลมของ Nanayakkara (1997) และ Østergaard (2007) โดยการติดตั้งตัวทำนายความเร็วลมเป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การติดตั้งตัวทำนายความเร็วลม

4.2 การควบคุมในช่วงภาระบางส่วน

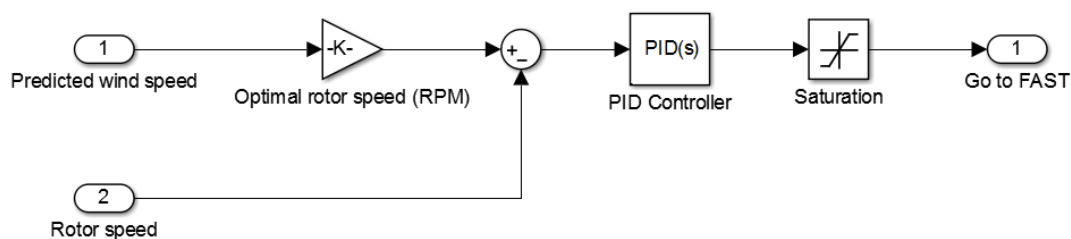
สำหรับช่วงภาระบางส่วน (ความเร็วลม 6 ถึง 10 เมตรต่อวินาที) การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบการควบคุมระหว่างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนและตัวควบคุมพีไอ โดยตัวแปรปรับคือ เจนเนอเรเตอร์ทอร์ค และตัวแปรควบคุมคือ ความเร็วโรเตอร์ ซึ่งเซตพอยต์จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เซตพอยต์ของความเร็วโรเตอร์ที่ความเร็วลมต่างๆ

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	เซตพอยต์ของความเร็วโรเตอร์ (รอบต่อนาที)
6	33.8
7	39.4
8	45.0
9	50.6
10	56.3

4.2.1 การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ

ทำการจูนตัวควบคุมโดยใช้วิธี SIMC และต่อระบบการควบคุมลูปปิด ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ระบบการควบคุมแบบลูปปิดของตัวควบคุมพีไอในช่วงภาระบางส่วน

4.2.2 การควบคุมโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน

จำเป็นต้องสร้างสมการแบบจำลองขึ้นมา โดยแบบจำลองดังกล่าวอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร โดยมีขั้นตอนการสร้าง คือ (1) การหาผลตอบสนองแบบสเต็ประหว่าง เจนเนอเรเตอร์ทอร์ค (ตัวแปรปรับ) และความเร็วโรเตอร์ (ตัวแปรควบคุม) ณ ตำแหน่งดำเนินการต่างๆ ดังตาราง 4.2 (2) แปลงข้อมูลจากผลตอบสนองแบบสเต็ปให้อยู่ในรูปสมการสเตต-สเปซ (สมการที่

2.14 และ 2.15) (3) เชื่อมสมการสเตต-สเปซเหล่านั้นเข้าด้วยกันโดยใช้การประมาณค่าในช่วง (interpolation) (สมการที่ 2.16 และ 2.17)

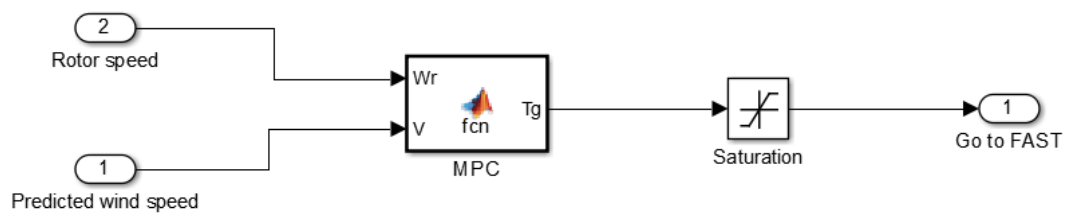
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งดำเนินการสำหรับสร้างผลตอบสนองแบบสแต็ป

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	เจนเนอเรเตอร์ทอร์ค (Nm)
6	250
6	300
6	350
6	400
8	500
8	600
8	700
8	800
10	750
10	900
10	1050
10	1200

นำสมการดังกล่าวมาออกแบบตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทวนชนิดออฟไลน์ ซึ่งแบ่งส่วนการดำเนินการเป็นสองส่วนหลักๆ คือ

(1) การดำเนินการขณะออฟไลน์ : ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที เลือก $X_d = [-30, -25, -20, -15, -10, -8, -6, -4, -2, -1.8, -1.6, -1.4, -1.2, -1.0, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30]$ จากนั้นแก้ปัญหาออปติไมเซชันสำหรับ RMPC ตามสมการที่ 2.24 ถึง 2.28 เพื่อรวบรวมเซตข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแกนของตัวควบคุม (K) และ Q^{-1} ดังนี้ $[K, Q^{-1}] = \{(K_1, Q_1^{-1}), (K_2, Q_2^{-1}), \dots, (K_{max}, Q_{max}^{-1})\}$ เมื่อ $Q_m^{-1} < Q_{m+1}^{-1}$ หลังจากนั้นทำซ้ำที่ความเร็วลมอื่นๆ ได้แก่ 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5 และ 10 เมตรต่อวินาที

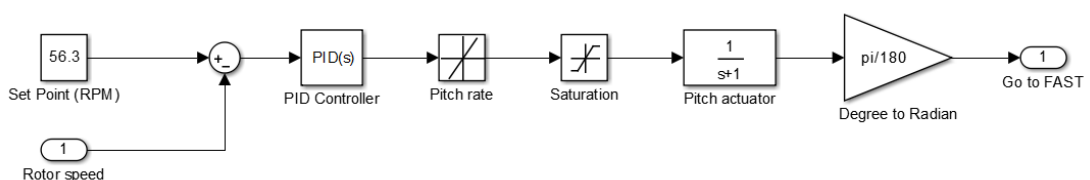
(2) การดำเนินการขณะออนไลน์ : ในระบบควบคุมแบบลูปิด ณ เวลาหนึ่งๆ ตัวแปรสเตรต (X) และความเร็วมจะถูกวัด จากนั้นนำข้อมูลทั้งสองไปทำการเลือกค่าเกินของตัวควบคุมอย่างเหมาะสมจากเซตข้อมูลที่สร้างไว้ โดยหลักการเลือกคือ จะเลือกค่าเกินที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ที่ยังคงทำให้เงื่อนไข $x_k^T Q_m^{-1} x_k \leq 1$ เป็นจริง เมื่อเลือกค่าเกินได้ จะสามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับได้ จาก $u_k = K_m x_k$



รูปที่ 4.3 ระบบการควบคุมแบบลูปิดของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนในช่วงภาระบางส่วน

4.3 การควบคุมในช่วงภาระเต็ม

สำหรับช่วงภาระเต็ม (ความเร็วลม 10 ถึง 15 เมตรต่อวินาที) การศึกษานี้ทำการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยที่ตัวแปรปรับคือ มุมใบพัด และตัวแปรควบคุมคือ ความเร็วโรเตอร์ ซึ่งเซตพอยต์ถูกกำหนดไว้เท่ากับ 56.3 รอบต่อวินาที ทำการจูนตัวควบคุมพีไอโดยใช้วิธี SIMC และต่อระบบการควบคุมแบบลูปิด ดังรูปที่ 4.4 โดยตัวปรับมุมใบพัด (pitch actuator) ถูกแทนด้วยทรานสเฟอร์ฟังก์ชันอันดับหนึ่ง

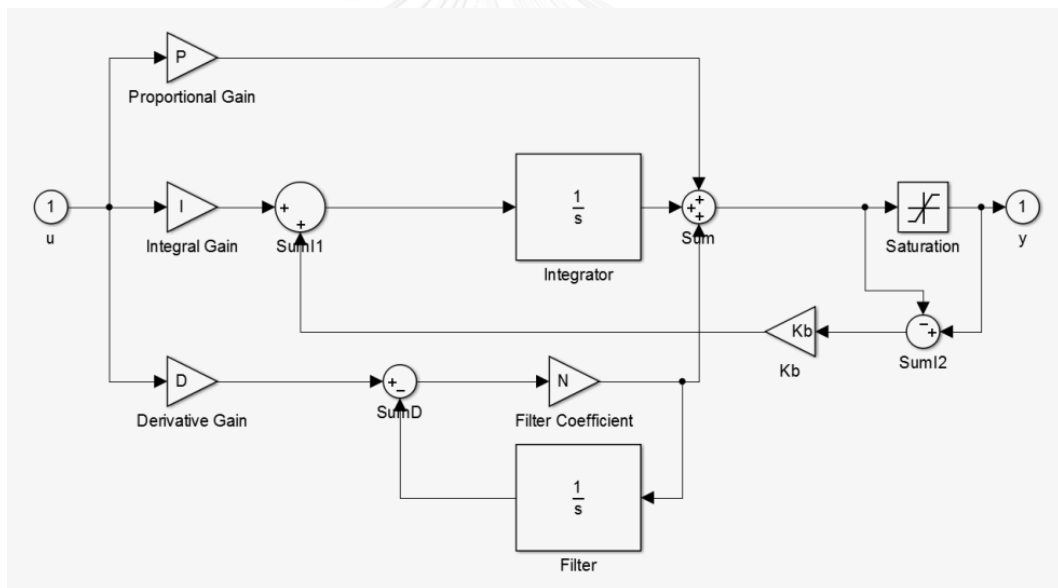


รูปที่ 4.4 ระบบการควบคุมแบบลูปิดของตัวควบคุมพีไอในช่วงภาระเต็ม

4.4 การควบคุมในช่วงการเปลี่ยนแปลง

สำหรับการควบคุมในช่วงการเปลี่ยนแปลง จะทำการศึกษาโดยเชื่อมช่วงภาระบางส่วนและช่วงภาระเต็มเข้าด้วยกัน โดยมีเงื่อนไขการเปลี่ยนโหมดการควบคุมคือ ความเร็วลม ถ้าหากความเร็วลมต่ำกว่า 10 เมตรต่อวินาที จะเป็นการควบคุมในช่วงภาระบางส่วน หรือที่เรียกว่า “การควบคุมทอร์ค (torque control)” และถ้าหากความเร็วลมสูงกว่า 10 เมตรต่อวินาที จะเป็นการควบคุมในช่วงภาระเต็ม หรือที่เรียกว่า “การควบคุมมุมใบพัด (pitch control)”

ระหว่างที่มีการเปลี่ยนโหมดควบคุมจากการควบคุมทอร์คเป็นการควบคุมมุมใบพัด มักมีปัญหาวินด์อัฟเกิดขึ้น ในการศึกษานี้จึงทำการติดตั้งตัวแอนตี้วินด์อัฟชนิดคำนวณย้อนกลับ (back calculation) (รูปที่ 4.5) โดยทำการศึกษาเพื่อหาพารามิเตอร์การจูน (k_b) ที่เหมาะสม ค่าที่ทำการศึกษาคือ k_b เท่ากับ 0.1, 0.3, และ 1.0



รูปที่ 4.5 การติดตั้งตัวแอนตี้วินด์อัฟชนิดคำนวณย้อนกลับ

4.5 ระบบกังหันลมที่ใช้ในการศึกษา

ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าที่ศึกษาคือ กังหันลมชนิดความเร็วผันแปรได้ (variable speed wind turbine) ซึ่งถูกใช้ในโครงการ National Renewable Energy Laboratory (NREL) ที่มีชื่อว่า AWT-27 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรสำคัญของระบบกังหันลมนี้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์และตัวแปรของระบบกังหันลมที่ศึกษา

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ความสูงของดุม (Hub height; h)	41.98	m
รัศมีโรเตอร์ (r)	13.757	m
ความหนาแน่นของอากาศ (ρ)	1.29	kg m ⁻³
ความเฉื่อยของโรเตอร์ (rotor inertia; J_r)	335.34	kg m ²
ความเฉื่อยของเจนเนอเรเตอร์ (generator inertia; J_g)	59.26	kg m ²
สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเพลลา (Shaft damping coefficient; B_{S})	1×10^6	N m rad ⁻¹ s
สัมประสิทธิ์ความแข็งของเพลลา (Shaft stiffness coefficient; K_{S})	50×10^6	N m rad ⁻¹
อัตราส่วนห้องทดรอบกำลัง (gear box ratio; N_g)	22.5	
ความเร็วลมที่ศึกษา (V)	6 - 15	m s ⁻¹
ความเร็วลมที่กำหนด (rated wind speed; V_r)	10	m s ⁻¹
ความเร็วโรเตอร์ที่กำหนด (rated rotor speed)	56.3	RPM
เจนเนอเรเตอร์ทอร์ก (generator torque; T_g)	0 ถึง 2000	N m
มุมใบพัด (pitch angle; β)	0 ถึง 30	Degree
อัตราการปรับมุมใบพัด (pitch rate)	5	Degree s ⁻¹

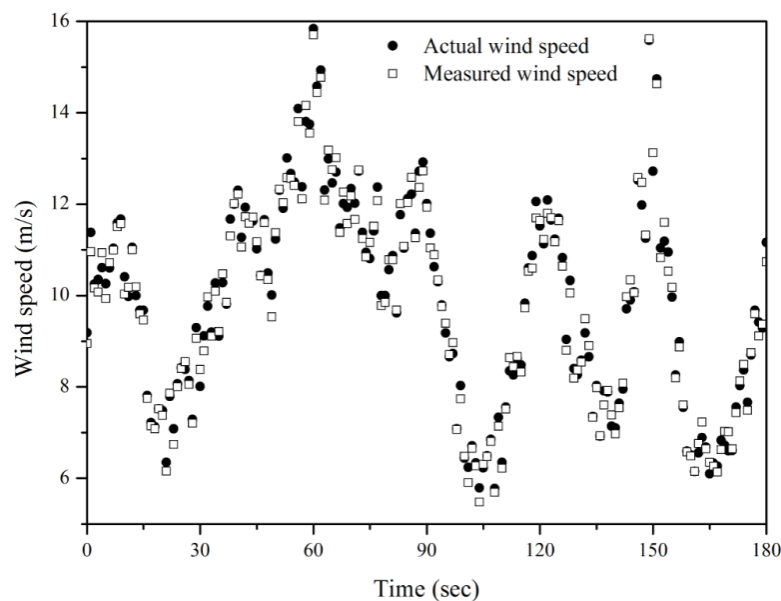
บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

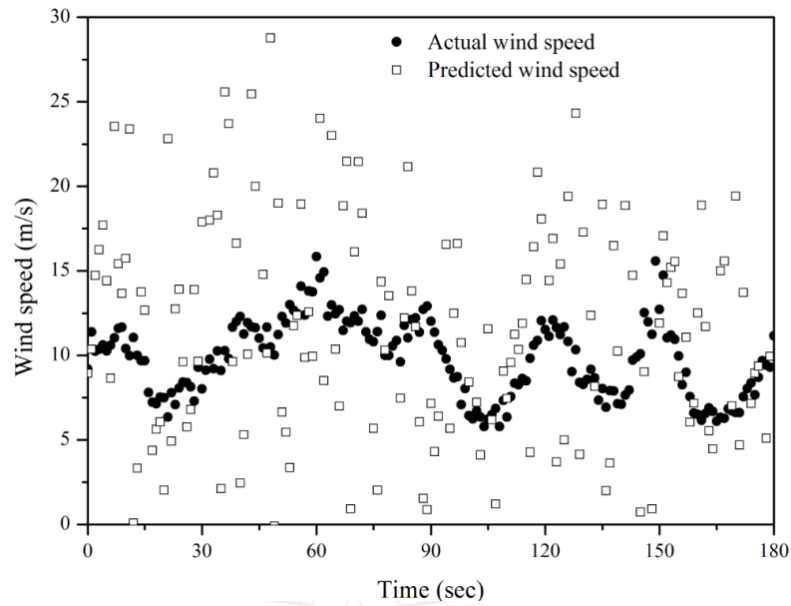
ในบทนี้กล่าวถึงผลจากการจำลองกระบวนการควบคุมระบบกังหันลมแบบความเร็วผันแปร ซึ่งพิจารณาตลอดช่วงการควบคุม กล่าวคือช่วงภาวะบางส่วน ช่วงการเปลี่ยนแปลง และช่วงภาวะเต็ม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาตัวทำนายความเร็วลมเพื่อนำไปใช้กับตัวควบคุม สำหรับการควบคุมจะพิจารณาช่วงภาวะบางส่วนและภาวะเต็มแยกกันก่อน หลังจากนั้นจึงรวมทั้งสองช่วงเข้าด้วยกันผ่านช่วงการเปลี่ยนแปลง

5.1 การศึกษาตัวทำนายความเร็วลม (wind predictor)

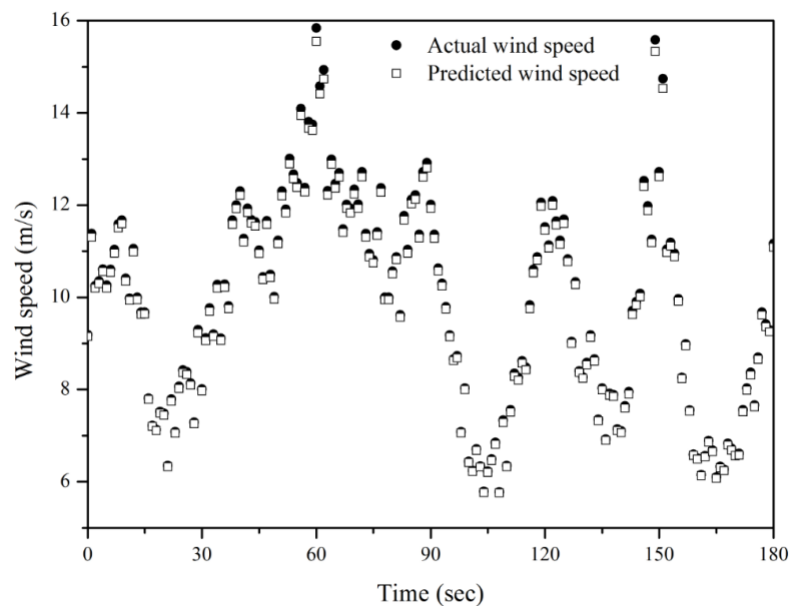
ความเร็วลมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมระบบกังหันลมอย่างมาก เนื่องจากความเร็วลมเป็นตัวกำหนดค่าเซตพอยต์และเป็นตัวกำหนดโหมดการควบคุมอีกด้วย ปกติแล้วความเร็วลมถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (anemometer) แต่พบว่าค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดค่อนข้างมาก (รูปที่ 5.1) ดังนั้นตัวทำนายความเร็วลมจึงมีความสำคัญอย่างมาก ตัวทำนายความเร็วลมที่ศึกษา ได้แก่ ตัวทำนายความเร็วลมของ Nanayakkara et al. (1997) และตัวทำนายความเร็วลมของ Østergaard et al. (2007) ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.4



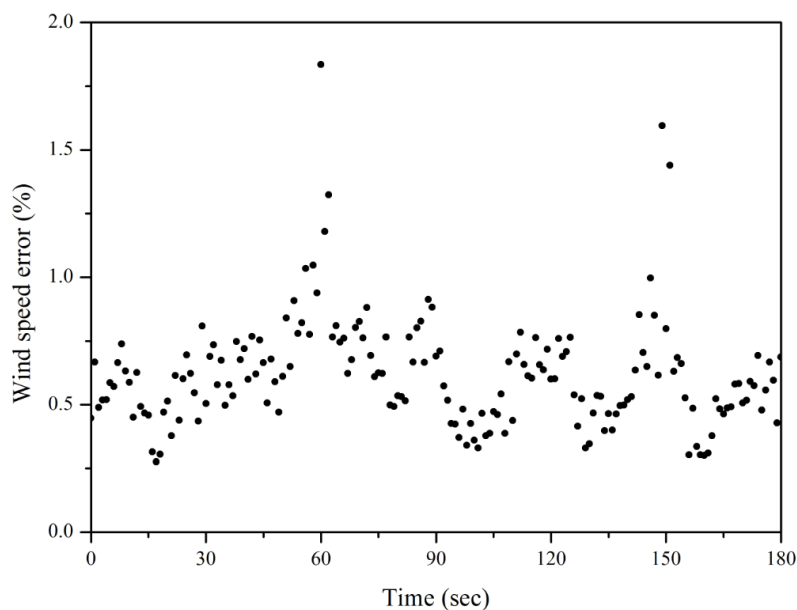
รูปที่ 5.1 ความเร็วลมที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ 3 ถ้วย รุ่น SK-7760-00



รูปที่ 5.2 ความเร็วลมที่ถูกทำนายด้วยตัวทำนายความเร็วลมของ Nanayakkara (1997)



รูปที่ 5.3 ความเร็วลมที่ถูกทำนายด้วยตัวทำนายความเร็วลมของ Østergaard (2007)



รูปที่ 5.4 ความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วลมจริงกับความเร็วลมจากการทำนาย
ด้วยวิธีของ Østergaard

รูปที่ 5.1 ถึง 5.4 แสดงความเร็วลมที่ถูกใช้ในการจำลองกระบวนการ เปรียบเทียบระหว่างความเร็วลมจริง ความเร็วลมจากการวัด และความเร็วลมจากการทำนาย เครื่องวัดความเร็วลมที่ใช้เป็นแบบสามถ้วย ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 0.5 เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า 10 เมตรต่อวินาที และมีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความเร็วลมสูงกว่า 10 เมตรต่อวินาที ผลจากการวัดเป็นระยะเวลา 3 นาที พบว่าความเร็วลมจากการวัดมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.91 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการทำนายความเร็วลมด้วยวิธีของ Nanayakkara (รูปที่ 5.2) เป็นการทำนายความเร็วลมโดยใช้ความเร็วลมที่วัดได้ในอดีตย้อนหลัง 27 ค่า ซึ่งผลการทดลองพบว่า หากข้อมูลความเร็วลมที่วัดได้มีความแปรปรวนมากส่งผลให้ความเร็วลมที่ทำนายได้มีความแปรปรวนที่มากขึ้น ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทำนายด้วยวิธีนี้เท่ากับ 73.02 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าวิธีดังกล่าวไม่เหมาะสมในการทำนายความเร็วลม เนื่องจากหลักการที่ใช้ในการทำนายอาศัยเพียงข้อมูลในอดีตจึงมีโอกาสผิดพลาดสูง

จากรูปที่ 5.3 เป็นการทำนายความเร็วลมโดยใช้วิธีของ Østergaard ซึ่งประมาณความเร็วลมจากความเร็วโรเตอร์และแอร์ไดนามิกทอร์ค เห็นได้ว่าความเร็วที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกับความเร็วลมจริงเป็นอย่างมาก โดยพบว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.19 ถึง 1.92

เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 5.4) และมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.61 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากวิธีการทำนายดังกล่าวพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์และแอมโพลิตูดของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนใบพัด ขณะนั้น สรุปได้ว่า วิธีนี้ให้ผลความเร็วลมที่แม่นยำกว่าการใช้ความเร็วลมจากการวัดโดยตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวทำนายความเร็วลมชนิดนี้เพื่อใช้ตลอดการทดลอง

5.2 การศึกษาการควบคุมในช่วงภาระบางส่วน (partial load regime)

ช่วงภาระบางส่วนมีวัตถุประสงค์การควบคุมคือ ควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้เข้าสู่เซตพอยต์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม (setpoint tracking) โดยมีเจนเนอเรเตอร์ทอร์คเป็นตัวแปรปรับ ตัวควบคุมที่ถูกศึกษาในงานนี้คือการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนเปรียบเทียบกับการใช้ตัวควบคุมพีไอดี

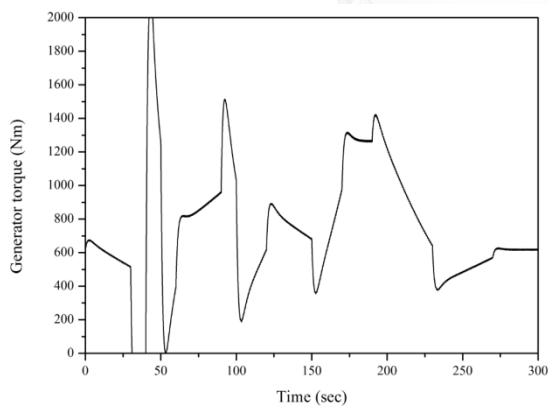
5.2.1 การควบคุมในช่วงภาระบางส่วนโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนจำเป็นต้องใช้สมการแบบจำลอง ซึ่งในการศึกษานี้ทำการสร้างสมการแบบจำลองจากข้อมูลการทดลองโดยอาศัยผลตอบสนองแบบสเต็ปที่ตำแหน่งดำเนินการต่างๆ (รูปที่ 5-1) โดยสมการแบบจำลองที่ได้รับอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปร (LPV model) ข้อมูลสัมประสิทธิ์ A และ B ของสมการดังกล่าวเป็นไปตามตารางที่ 5.1 จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมาโดยเทียบกับผลการจำลองกระบวนการของฟาสต์ (FAST) โดยป้อนชุดตัวแปรอินพุทที่เหมือนกันเข้าสู่ทั้ง LPV และ FAST (รูปที่ 5.5) ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.6

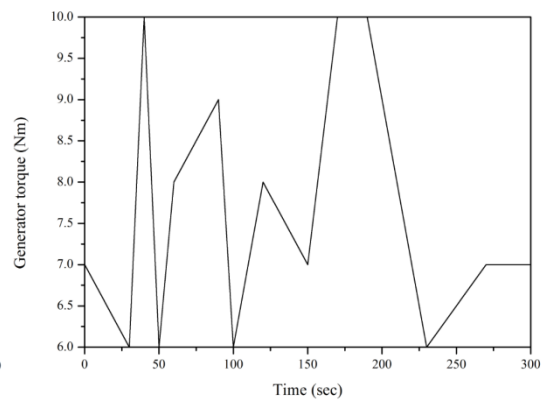
จากรูปที่ 5.6 ก เห็นได้ว่า เมื่อป้อนชุดตัวแปรอินพุทที่เหมือนกันให้กับ LPV และ FAST model ผลตอบสนองของความเร็วโรเตอร์ของทั้งสองมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วโรเตอร์อยู่ระหว่าง 0 ถึง 3.2 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 5.5 ข) และมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.71 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่า สมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรที่ถูกสร้างขึ้นมา มีความถูกต้องสูงจึงสามารถเป็นตัวแทนของระบบกังหันลมนี้ได้

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรจากผลตอบสนองแบบสแต็ป

Wind speed (m/s)	Generator torque (Nm)	A	B
6	250	-0.0318	-0.0030
6	300	-0.0298	-0.0029
6	350	-0.0289	-0.0031
6	400	-0.0246	-0.0031
8	500	-0.0414	-0.0030
8	600	-0.0403	-0.0031
8	700	-0.0370	-0.0034
8	800	-0.0195	-0.0024
10	750	-0.0509	-0.0029
10	900	-0.0500	-0.0030
10	1050	-0.0476	-0.0032
10	1200	-0.0312	-0.0027



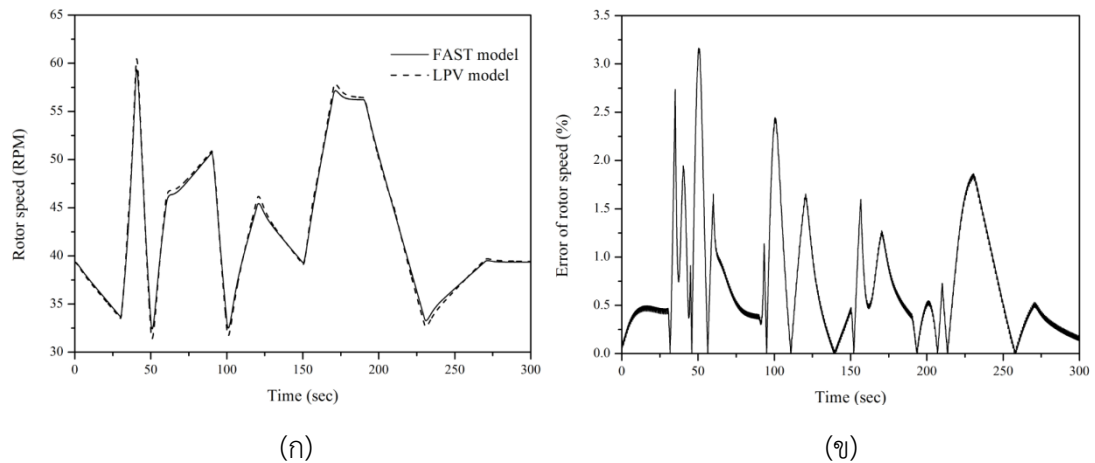
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.5 ชุดตัวแปรอินพุทที่ถูกใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของ LPV model

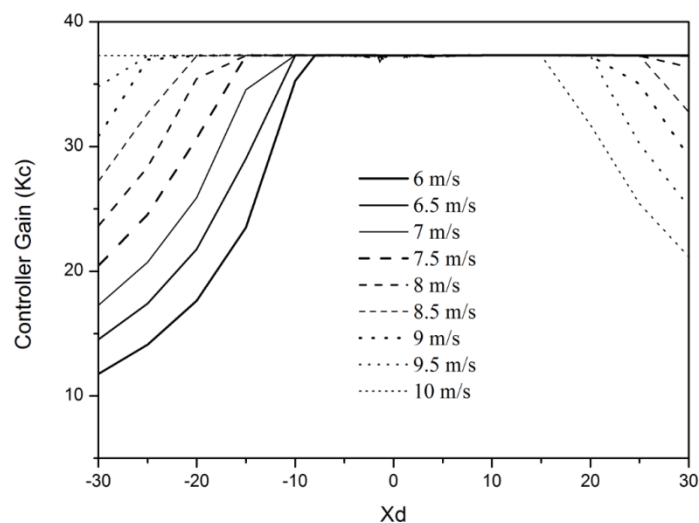
(ก) เจนเนเรเตอร์ทอร์ก (ข) ความเร็วลม



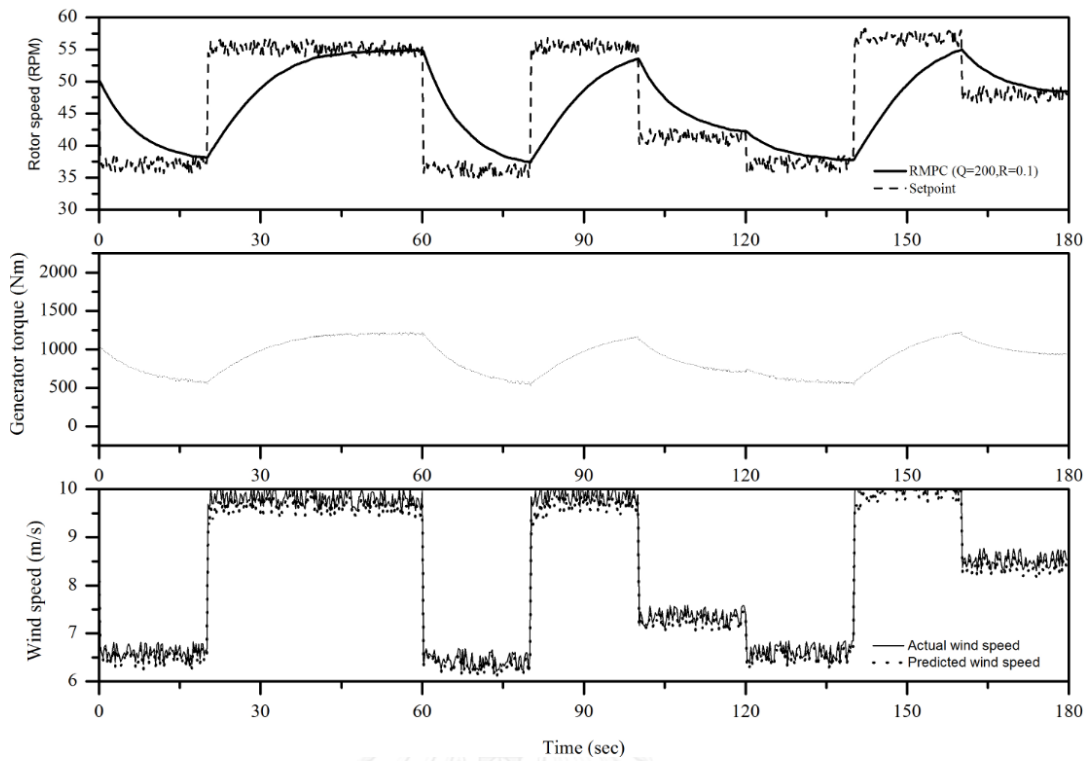
รูปที่ 5.6 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของ LPV model เทียบกับ FAST model

(ก) ความเร็วโรเตอร์ (ข) ความคลาดเคลื่อนของความเร็วโรเตอร์

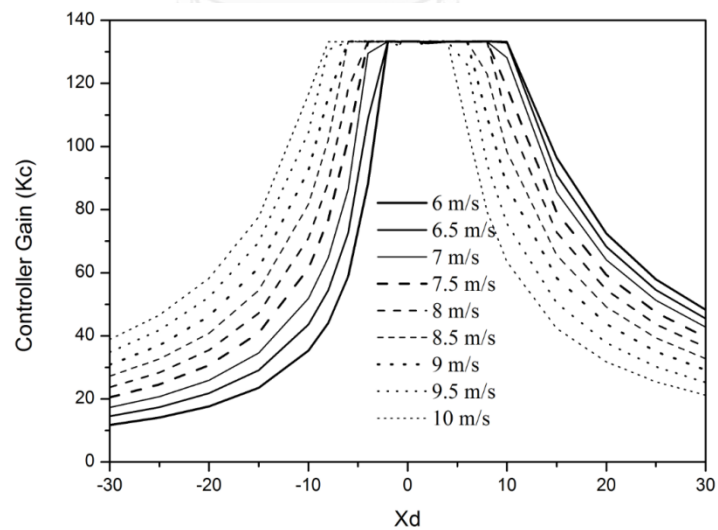
หลังจากนั้นสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรดังกล่าวถูกนำไปใช้กับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนเพื่อควบคุมระบบกังหันลมในช่วงภาระบางส่วน โดยเลือกใช้การควบคุมชนิดออฟไลน์ซึ่งจะทำการแก้ปัญหาออฟติไมเซชันไว้ก่อนเพื่อรวบรวมค่าเกนของตัวควบคุม (controller gain; K_c) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในการควบคุมนี้ทำการเปรียบเทียบการจูนทั้งสิ้น 3 แบบ คือ (1) $Q=200$, $R=0.1$ (2) $Q=200$, $R=0.01$ และ (3) $Q=200$, $R=0.001$ ค่าเกนของตัวควบคุมที่ได้จากการคำนวณในช่วงออฟไลน์ถูกแสดงในตารางที่ ก-1 ถึง ก-2 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 5.7, 5.9 และ 5.11 ผลการจำลองกระบวนการควบคุมเป็นดังรูปที่ 5.8, 5.10 และ 5.12 และตารางที่ 5.1



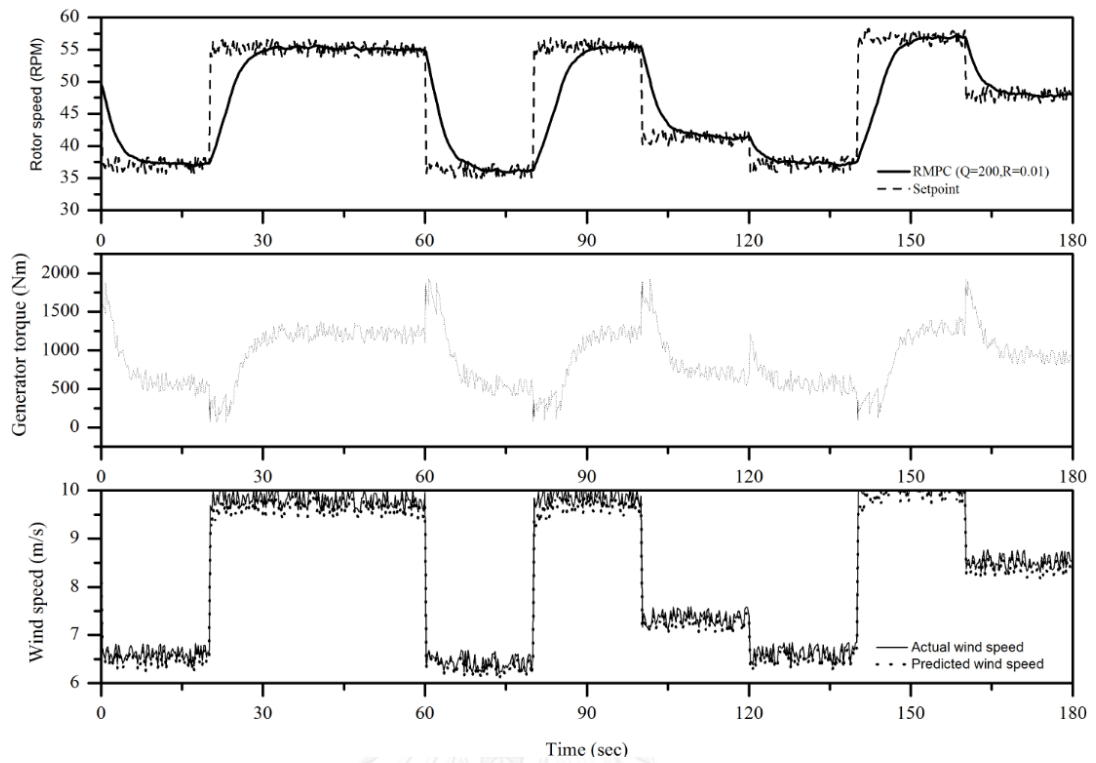
รูปที่ 5.7 ค่าเกนของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 1 $Q=200$, $R=0.1$)



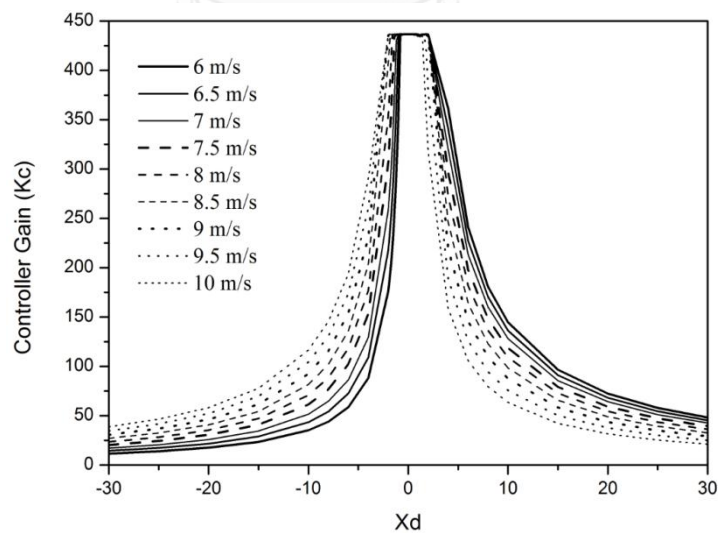
รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 1 $Q=200$, $R=0.1$)



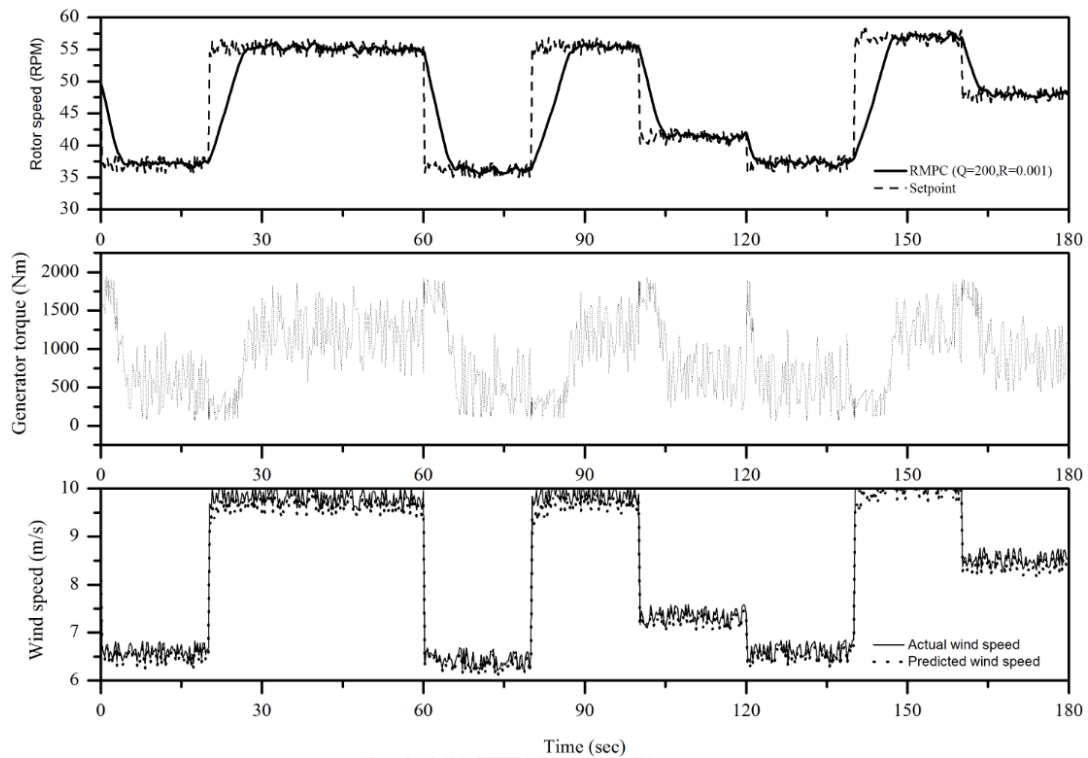
รูปที่ 5.9 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 2 $Q=200$, $R=0.01$)



รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 2 $Q=200$, $R=0.01$)



รูปที่ 5.11 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 3 $Q=200$, $R=0.001$)



รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (แบบที่ 3 $Q=200$, $R=0.001$)

ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมที่ได้จากการจูนทั้งสามแบบ (รูปที่ 5.7, 5.9 และ 5.11) แสดงให้เห็นว่า ค่าเกณฑ์มีค่าน้อยเมื่อมีค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรสแตตมีค่ามาก และค่าเกณฑ์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าคงที่เมื่อค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรสแตตเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่พบได้ทั่วไป นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบการจูนทั้งสามแบบจะเห็นว่า เมื่อตัวหวนวงน้ำหนักของตัวแปรปรับ (R) ลดลงจะทำให้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมมีค่าสูงขึ้น กล่าวคือ ตัวแปรปรับมีความอิสระในการปรับมากขึ้นนั่นเอง

จากรูปที่ 5.8, 5.10 และ 5.12 พบว่า การจูนทั้งสามแบบสามารถควบคุมให้ระบบอยู่ในเสถียรภาพได้ แต่สมรรถนะในการควบคุมแตกต่างกันออกไป การจูนทั้งสามแบบมีค่า Q เท่ากันทั้งหมด ขณะที่ค่า R แตกต่างกันไป โดยแบบที่ 1 มีค่า R มากที่สุด นั่นคือ $R=0.1$ จากรูปที่ 5.8 เห็นได้ว่าสมรรถนะการควบคุมไม่ค่อยดี เนื่องจากการถ่วงน้ำหนักไปที่ตัวแปรปรับมากทำให้ตัวควบคุมสามารถปรับตัวแปรปรับได้น้อย ผลตอบสนองจึงค่อยข้างช้า เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมดีขึ้น การจูนแบบที่ 2 จึงทำการลดค่า R ลงที่ $R=0.01$ เมื่อสังเกตจากรูปที่ 5.10 พบว่าสมรรถนะการควบคุมดีกว่าแบบที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด เหตุผลคือการปรับลดตัวถ่วงน้ำหนักที่ตัวแปรปรับลง ทำให้ตัว

แปรปรับมีอิสระในการปรับมากยิ่งขึ้นนั่นเอง และสำหรับการจูนแบบที่ 3 ลดค่า $R=0.001$ จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะการควบคุมดีขึ้นจากแบบที่ 2 เล็กน้อย ในขณะที่ตัวแปรปรับที่ใช้มีการแกว่งค่อนข้างมาก ซึ่งในกรณีดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือต่างๆ ได้ จึงถือว่าการจูนแบบที่ 3 นี้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง นอกจากนี้ตารางที่ 5.1 ช่วยยืนยันให้เห็นว่าการจูนแบบที่ 2 และ 3 ให้สมรรถนะการควบคุมที่แตกต่างกันเล็กน้อย ขณะที่ตัวแปรปรับของการจูนแบบที่ 3 มีการแกว่งค่อนข้างมาก ดังนั้นจากการศึกษานี้จึงสรุปว่า การจูนแบบที่ 2 เป็นการจูนที่เหมาะสมที่สุด

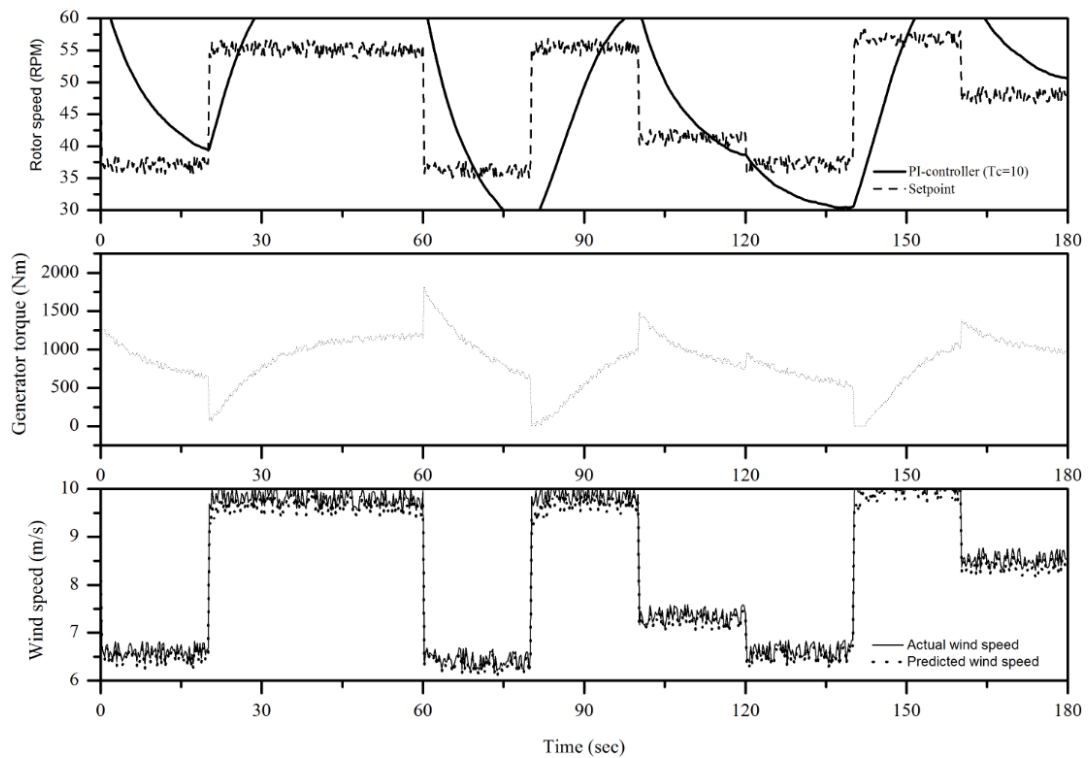
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนด้วยการจูนแบบต่างๆ

เกณฑ์การประเมินสมรรถนะการควบคุม	ค่าพารามิเตอร์การจูน (tuning parameter)		
	Q=200, R=0.1	Q=200, R=0.01	Q=200, R=0.001
IAE	917.0	459.8	402.7
ISE	7910.2	3878.1	3582.2
Mean error of rotor speed (RPM)	4.58	2.30	2.01
Standard deviation of rotor speed (RPM)	4.30	3.76	3.72
Standard deviation of generator torque (Nm)	32.71	108.93	252.95

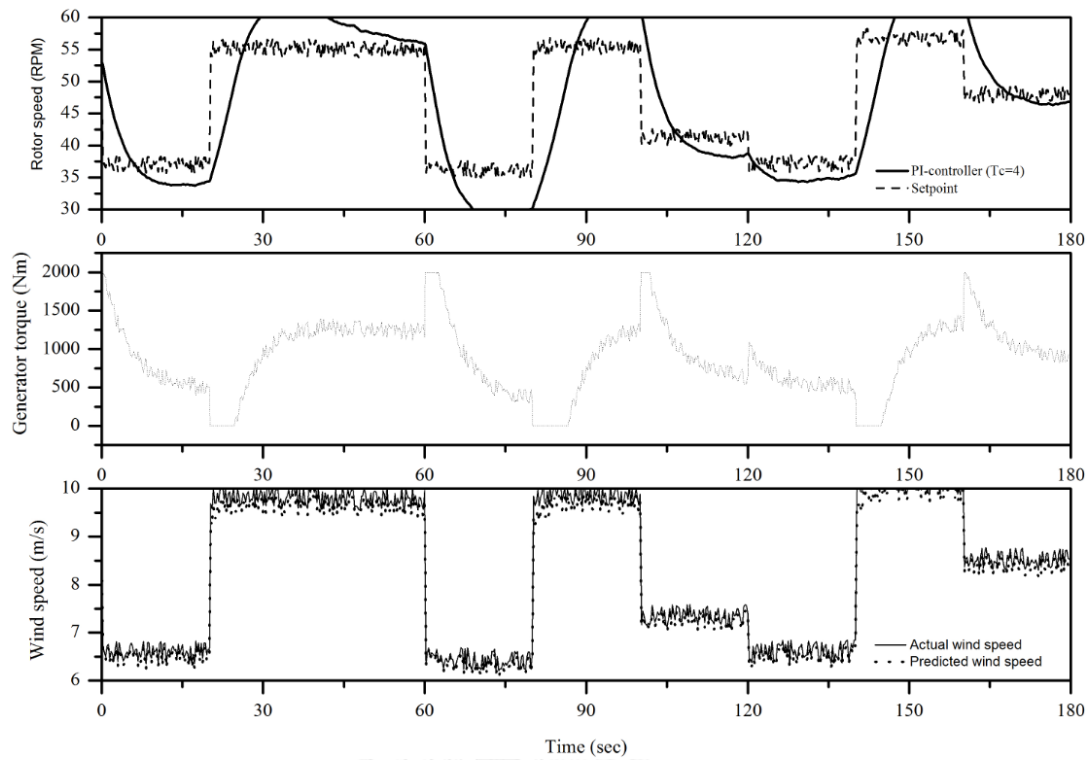
นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนชนิดออฟไลน์ สามารถลดระยะเวลาในการคำนวณได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนชนิดออนไลน์ กล่าวคือ หากใช้ตัวควบคุมชนิดออนไลน์จะใช้เวลาในการคำนวณ 0.2 วินาทีต่อเวลาเก็บตัวอย่าง ขณะที่ถ้าใช้ตัวควบคุมชนิดออฟไลน์จะใช้ระยะเวลา 0.00005 วินาทีต่อเวลาเก็บตัวอย่าง เนื่องจากตัวควบคุมชนิดออฟไลน์นี้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยมาก ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการจริงได้

5.2.2 การควบคุมในช่วงภาระบางส่วนโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ

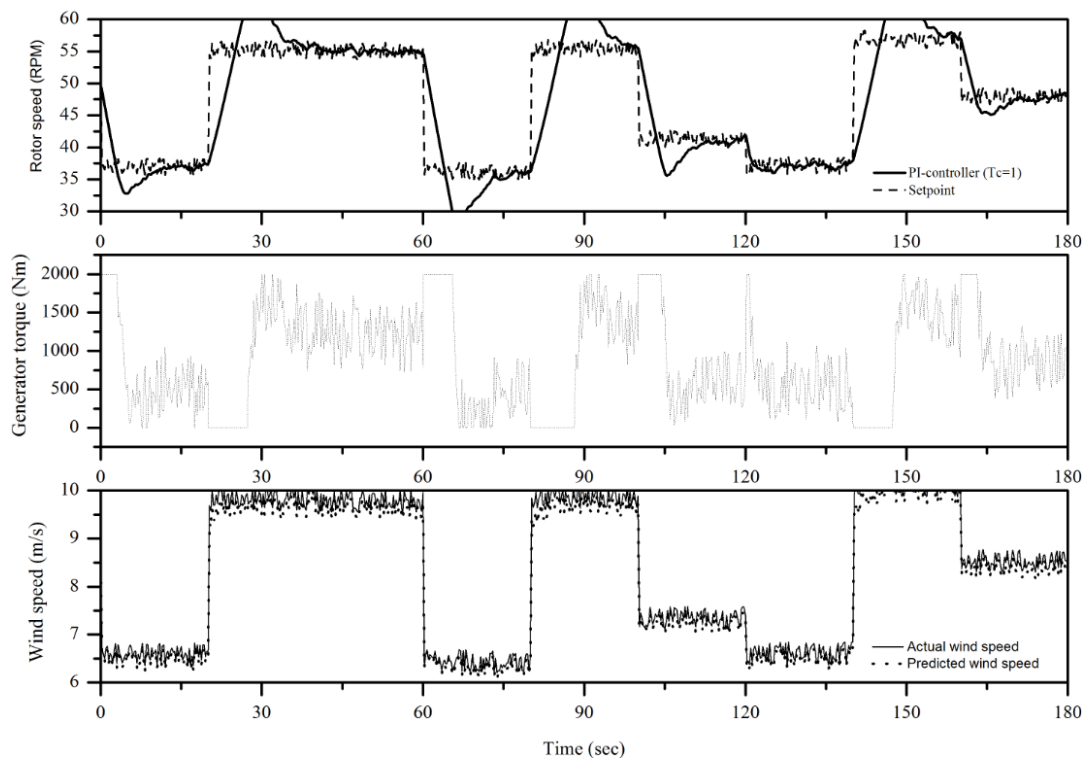
เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการควบคุมของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน จึงทำการทดลองควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ โดยวิธีการจูนที่เลือกใช้คือ SIMC ในการศึกษาครั้งนี้ทำการเปรียบเทียบการจูนทั้งหมด 3 แบบ ค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ทั้งสามแบบเป็นดังตารางที่ ก-4 ผลจากการจำลองกระบวนการควบคุมเป็นไปตามรูปที่ 5.13 ถึง 5.15 และตารางที่ 5.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการจูนแบบที่ 2 คือ $T_c=4$ ให้ผลการควบคุมที่ดี ในขณะที่ตัวแปรปรับยังสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 5.13 ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 1 $T_c=10$)



รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 2 $T_c=4$)



รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมช่วงภาระบางส่วนด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 3 $T_c=1$)

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอโดยใช้การจูนแบบต่างๆ

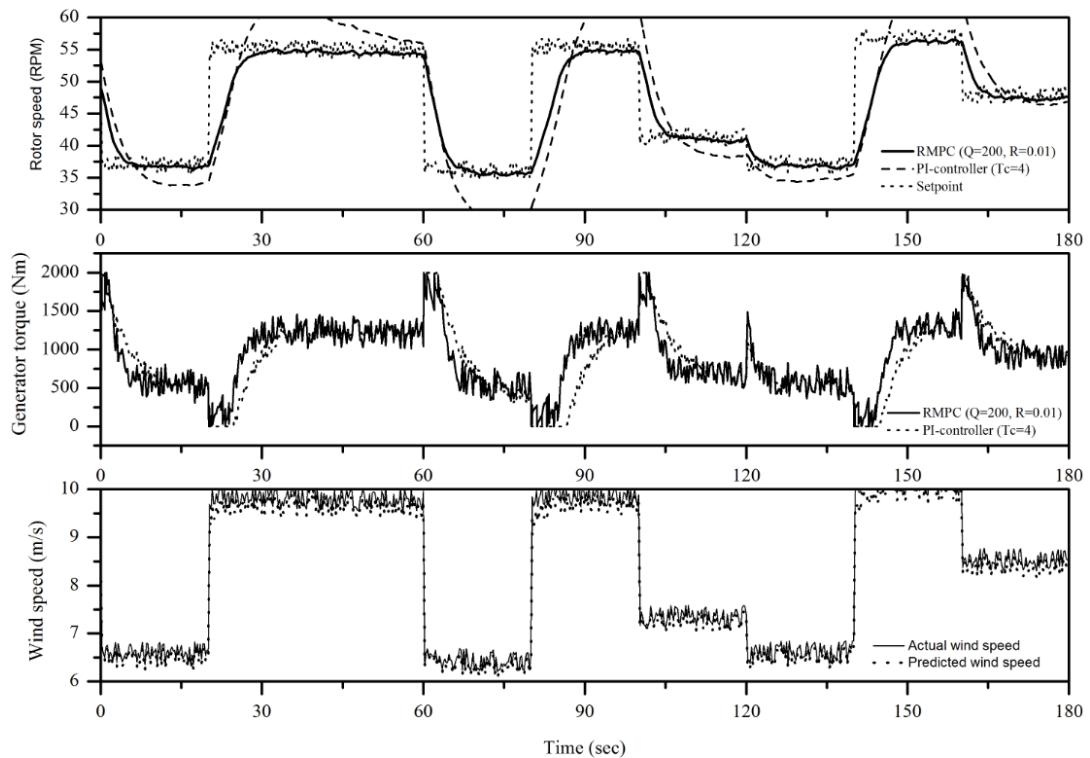
เกณฑ์การประเมินสมรรถนะการควบคุม	ค่าพารามิเตอร์สำหรับจูน (tuning parameter)		
	$T_c=10$	$T_c=4$	$T_c=1$
IAE	1806.5	1045.4	571.7
ISE	23529.4	8990.0	4227.2
Mean error of rotor speed (RPM)	9.03	5.23	2.85
Standard deviation of rotor speed (RPM)	6.01	4.20	3.60
Standard deviation of generator torque (Nm)	60.58	110.44	268.60

5.2.3 เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนและตัวควบคุมพีไอ

เปรียบเทียบผลการควบคุมระบบกักเก็บลมแบบความเร็วผันแปรในช่วงภาระบางส่วนระหว่างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนและตัวควบคุมพีไอโดยเลือกวิธีการจูนที่ดีที่สุดของแต่ละวิธีมาผลการจำลองกระบวนการเป็นดังรูปที่ 5.16 และตารางที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเจนเนอเรเตอร์ทอร์ค (ตัวแปรปรับ) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าการควบคุมในช่วงภาระบางส่วน การใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมีประสิทธิภาพมากกว่า

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดต่างๆ

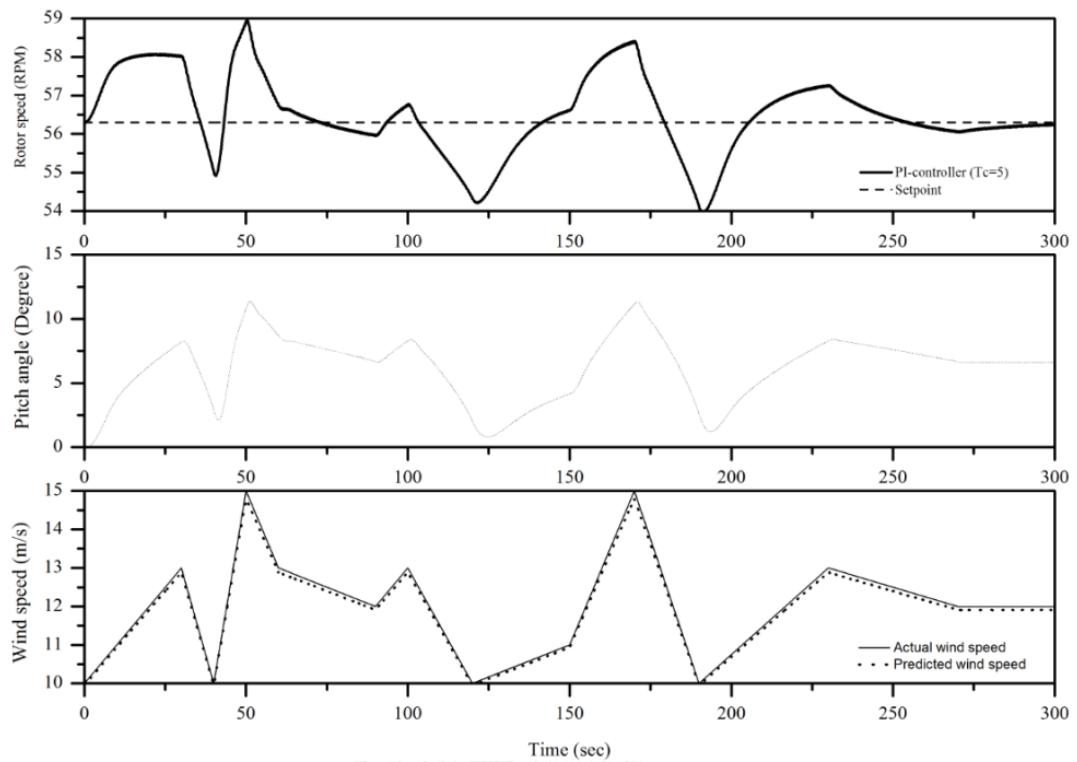
เกณฑ์การประเมินสมรรถนะการควบคุม	ตัวควบคุม	
	RMPC	PI
IAE	459.8	1045.4
ISE	3878.1	8990.0
Mean error of rotor speed (RPM)	2.30	5.23
Standard deviation of rotor speed (RPM)	3.76	4.20
Standard deviation of generator torque (Nm)	108.93	110.44



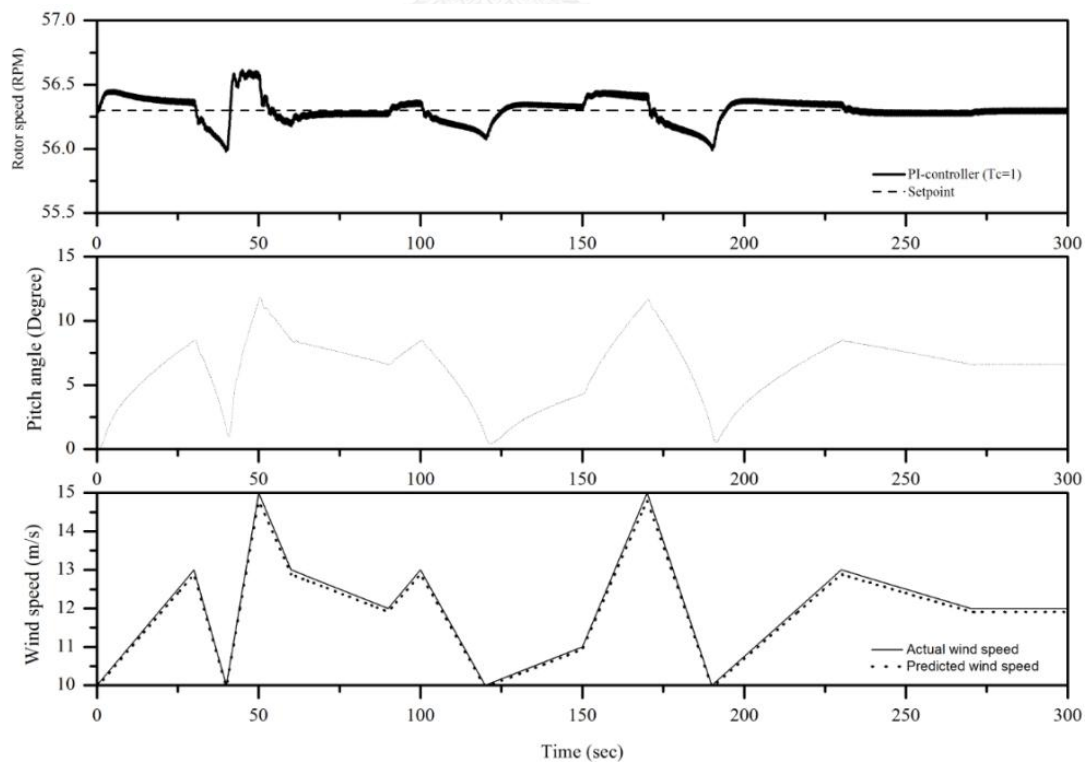
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน ($Q=200$, $R=0.01$) และตัวควบคุมพีไอ ($T_c=4$)

5.3 การศึกษาการควบคุมในช่วงภาระเต็ม (full load regime)

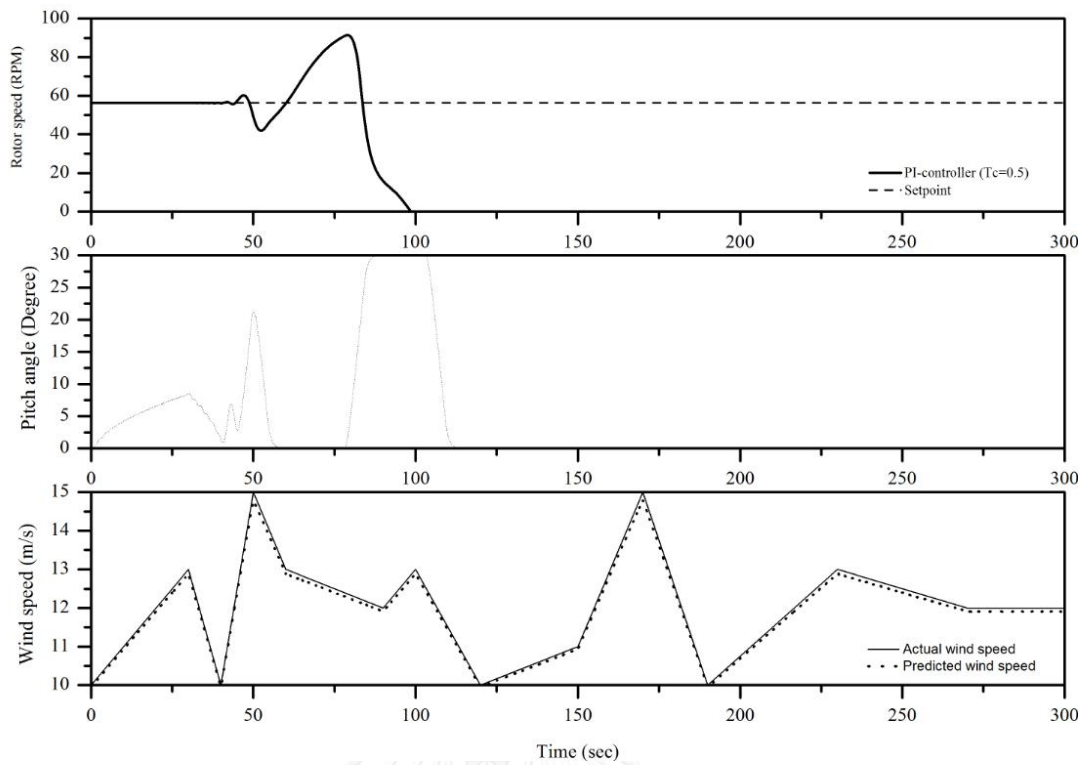
สำหรับช่วงภาระเต็มมีวัตถุประสงค์คือการควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้เข้าสู่ค่าความเร็วโรเตอร์กำหนด (rated rotor speed) โดยมีมุมใบพัดเป็นตัวแปรปรับ ในการศึกษาี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ และใช้วิธี SIMC สำหรับจูนตัวควบคุม เปรียบเทียบการจูนทั้งหมด 3 แบบ (ตารางที่ ก-5) ผลการควบคุมเป็นดังรูปที่ 5.17 ถึง 5.19 และตารางที่ 5.5 พบว่าการใช้ $T_c=5$ และ 1 สามารถควบคุมให้ความเร็วโรเตอร์เข้าสู่เซตพอยต์ได้ ซึ่งการใช้ T_c ต่ำจะทำให้สมรรถนะการควบคุมดีกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อลด T_c ลงมาที่ $T_c=0.5$ ตัวควบคุมไม่สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้ เนื่องจากแกนของตัวควบคุมจะมีค่ามากยิ่งขึ้น ทำให้มุมใบพัด (ตัวแปรปรับ) ที่ถูกคำนวณมีค่ามากขึ้น ขณะที่มุมที่สามารถปรับได้มีขอบเขตที่จำกัดคือ 0 ถึง 30 องศา จึงเป็นเหตุให้เกิดปัญหาข้างต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า $T_c=1$ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมระบบกังหันลมในช่วงภาระเต็ม



รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 1 $T_c=5$)



รูปที่ 5.18 ผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยตัวควบคุมพีไอ (แบบที่ 2 $T_c=1$)



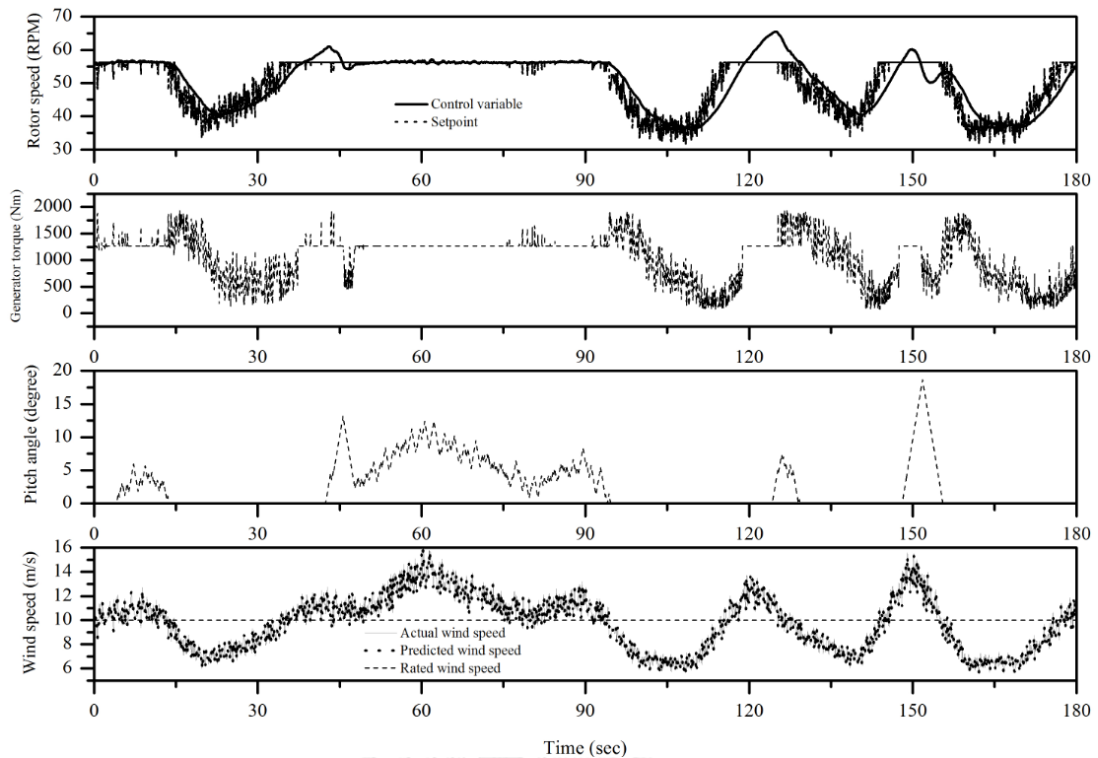
รูปที่ 5.19 ผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยตัวควบคุมพีไอดี (แบบที่ 3 $T_c=0.5$)

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการควบคุมช่วงภาระเต็มด้วยการจูนแบบต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์สำหรับจูน (tuning parameter)	IAE
$T_c=5$	227.00
$T_c=1$	21.45
$T_c=0.5$	4608.60

5.4 การศึกษาการควบคุมในช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition regime)

หลังจากที่ออกแบบตัวควบคุมสำหรับช่วงภาระบางส่วนและภาระเต็มเสร็จสิ้นแล้ว การควบคุมทั้งสองช่วงจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกัน โดยมีเงื่อนไขการเปลี่ยนโหมดการควบคุมคือความเร็วลมที่กำหนด (rated wind speed) ซึ่งในการศึกษานี้คือ 10 เมตรต่อวินาที ทำการจำลองกระบวนการควบคุมโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทนสำหรับช่วงภาระบางส่วน และตัวควบคุมพีไอสำหรับช่วงภาระเต็ม ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.20



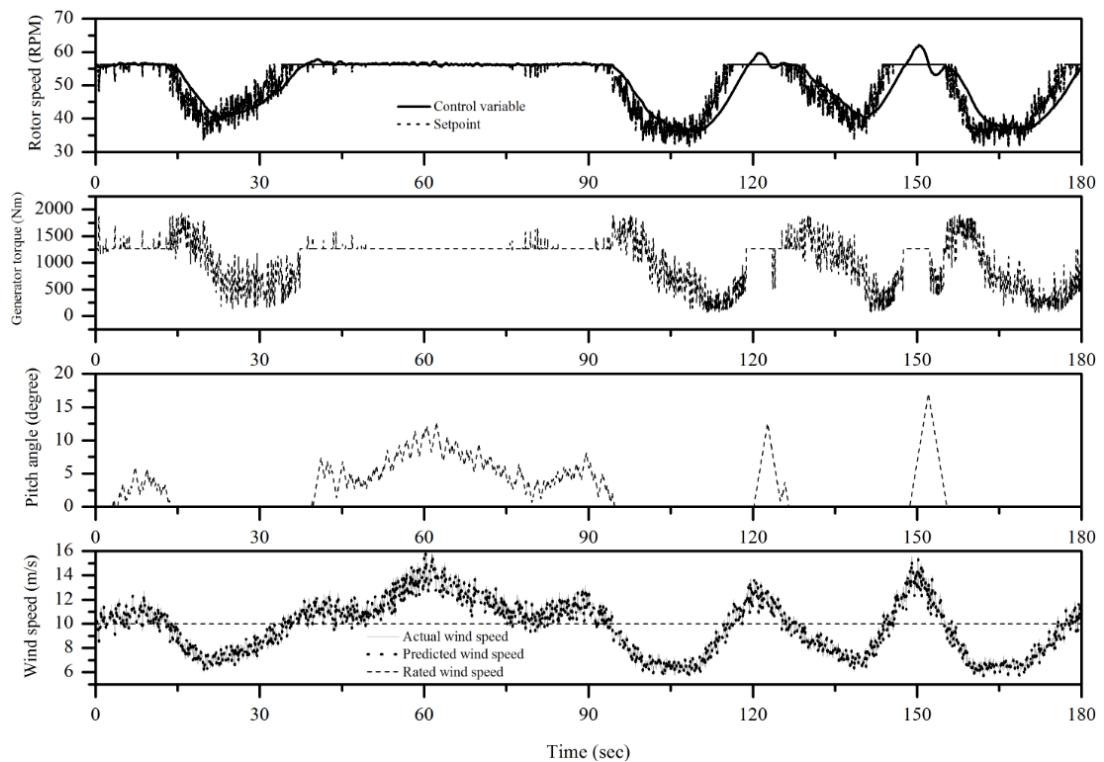
รูปที่ 5.20 ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (ไม่มีแอนตี้ไวน์อัพ)

จากรูปที่ 5.20 พบว่า การควบคุมโดยรวมมีประสิทธิภาพที่ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาช่วงที่มีการเปลี่ยนโหมดการควบคุมจะพบโอเวอร์ชูตของความเร็วโรเตอร์ขึ้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นในขณะที่เปลี่ยนโหมดจากภาวะเต็มเป็นภาวะบางส่วน (ความเร็วลมขาลง) แต่เกิดขึ้นเฉพาะการเปลี่ยนโหมดจากภาวะบางส่วนเป็นภาวะเต็ม (ความเร็วลมขาขึ้น) เท่านั้น เนื่องมาจากเมื่อความเร็วลมมีค่าต่ำ (ช่วงภาวะบางส่วน) โรเตอร์จะถูกควบคุมให้เข้าสู่เซตพอยต์ซึ่งมีค่าต่ำ หลังจากความเร็วลมสูงขึ้น (ช่วงภาวะเต็ม) ค่าเซตพอยต์จะมีค่ามากขึ้น ทำให้ความแตกต่างระหว่างตัวแปรสเตทและเซตพอยต์มีค่าติดลบ ส่งผลให้ตัวควบคุมใบพัดคำนวณค่ามุมใบพัดที่ต้องการปรับมีค่าติดลบ ซึ่งเกินขอบเขตการปรับมุมใบพัด (0 ถึง 30 องศา) ทำให้เกิดปัญหาไวน์อัพ (windup) ขึ้น

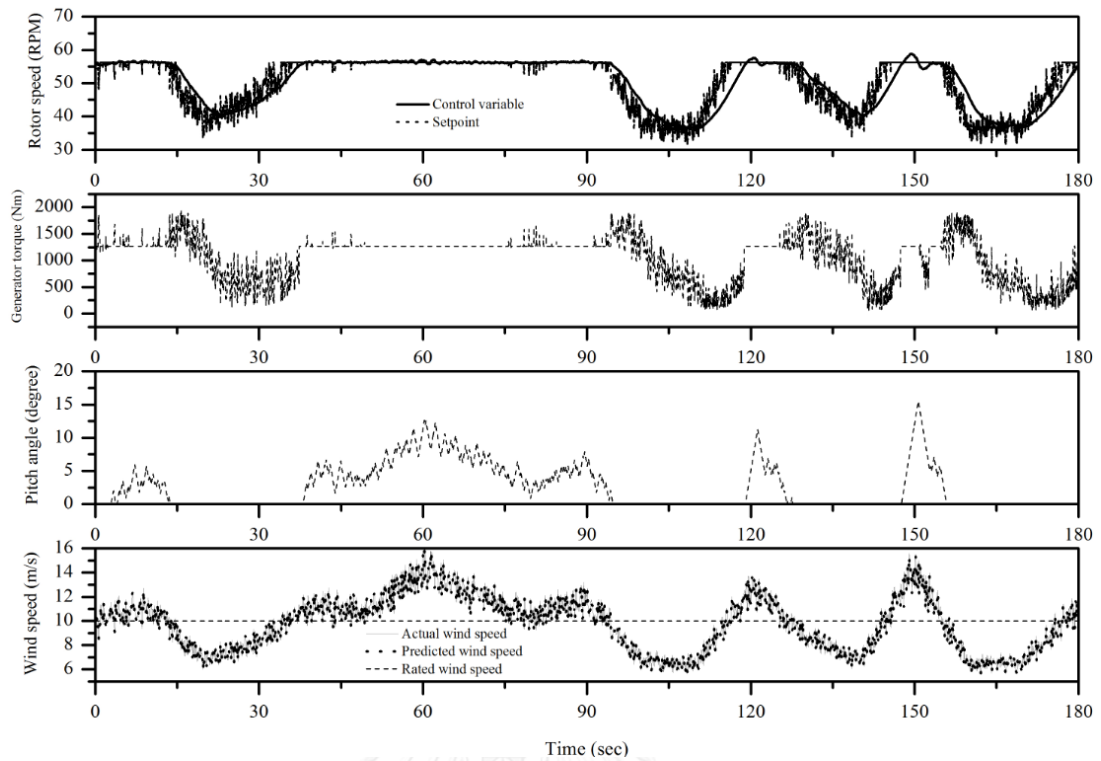
เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังต้น จึงเลือกติดตั้งแอนตี้ไวน์อัพให้กับตัวควบคุมมุมใบพัด โดยใช้เทคนิคคำนวณย้อนหลัง (back calculation) เทคนิคดังกล่าวมีพารามิเตอร์การจูนเพิ่มขึ้น 1 ตัว คือ k_b หลักการทำงานของตัวแอนตี้ไวน์อัพชนิดนี้คือการนำผลต่างของค่าตัวแปรปรับที่เกินขอบเขตมาคูณกับค่า k_b จากนั้นส่งค่าดังกล่าวเพื่อไปจัดการกับเทอมอินทิกรัล ตัวแอนตี้ไวน์อัพชนิดนี้จะทำการปรับรู้งเทอมอินทิกรัลอย่างช้าๆ จนกว่าค่าตัวแปรปรับที่คำนวณได้มีค่าที่ไม่เกินขอบเขต ซึ่งเป็นข้อดี

เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งตัวแอนตี้ไวน์อ็อปชนิดแคลมป์ (clamping) ซึ่งหลักการคือ จะทำการรีเซ็ตทอมอินทิกรัลเป็นศูนย์ทันทีเมื่อค่าตัวแปรปรับเกินค่าขอบเขต

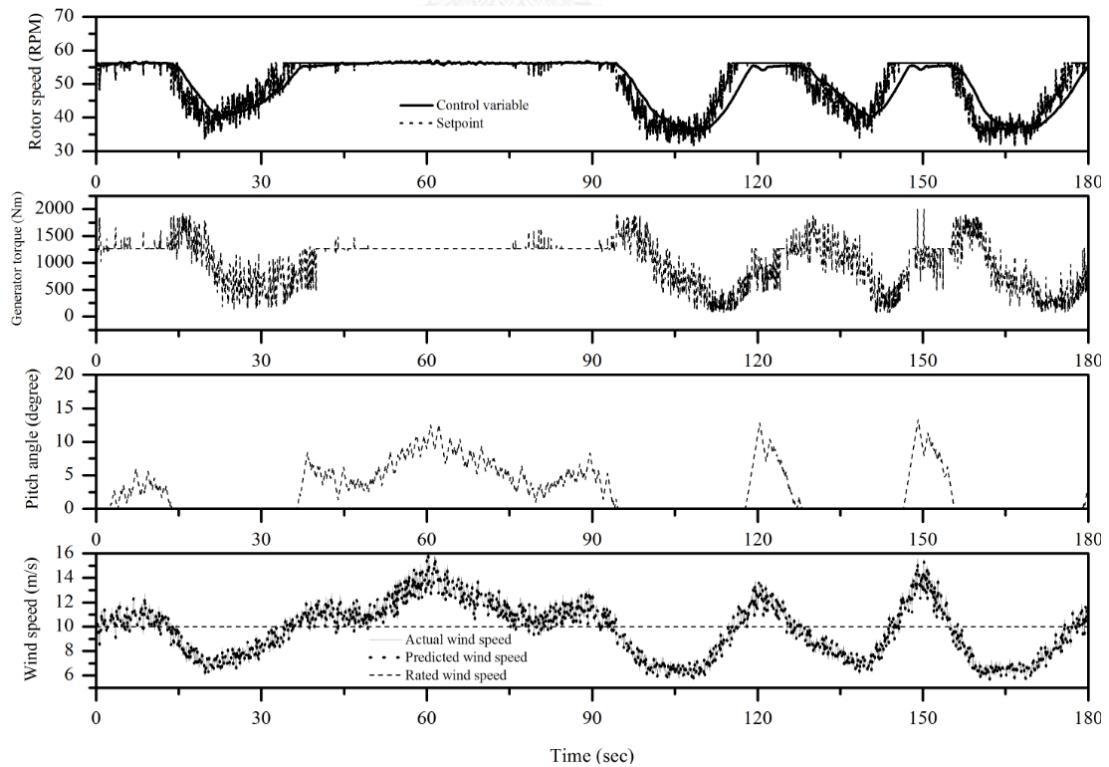
โดยในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ตัวแอนตี้ไวน์อ็อปแบบคำนวณย้อนกลับ หลักการในการจูนตัวแอนตี้ไวน์อ็อปชนิดคือ เลือกค่า k_b ให้อยู่ระหว่างค่า τ_d และ τ_i การศึกษานี้ทำการปรับจูนค่า k_b ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.1, 0.3, และ 1.0 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.21 ถึง 5.23 และตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (แอนตี้ไวน์อ็อป $k_b=0.1$)



รูปที่ 5.22 ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (แวนตีไวน์ออฟ $k_b=0.3$)



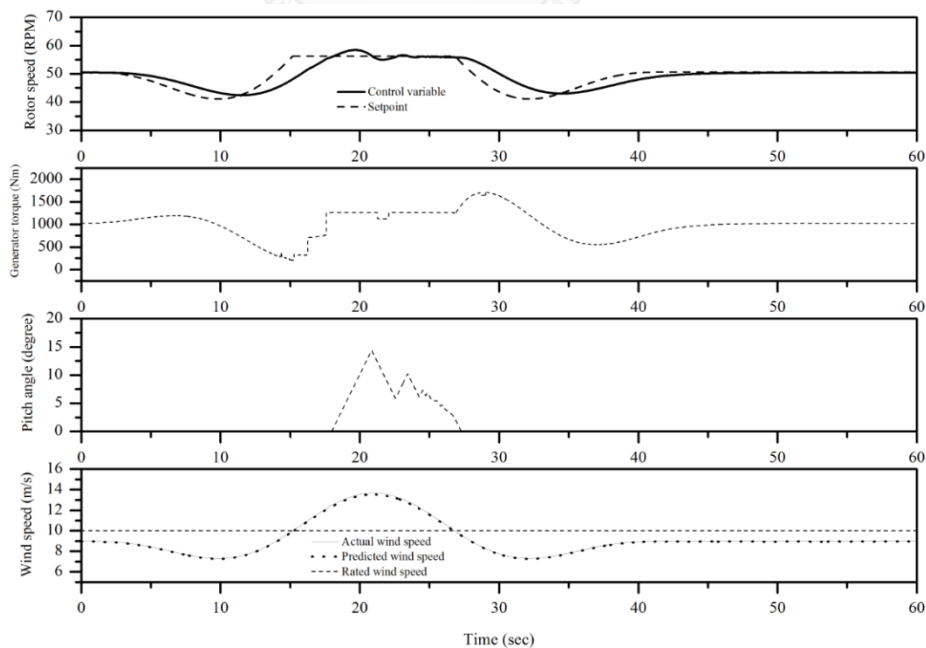
รูปที่ 5.23 ผลการควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลง (แวนตีไวน์ออฟ $k_b=1.0$)

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการควบคุมด้วยการจูนตัวแอนตี้ไวน์ออฟแบบต่างๆ

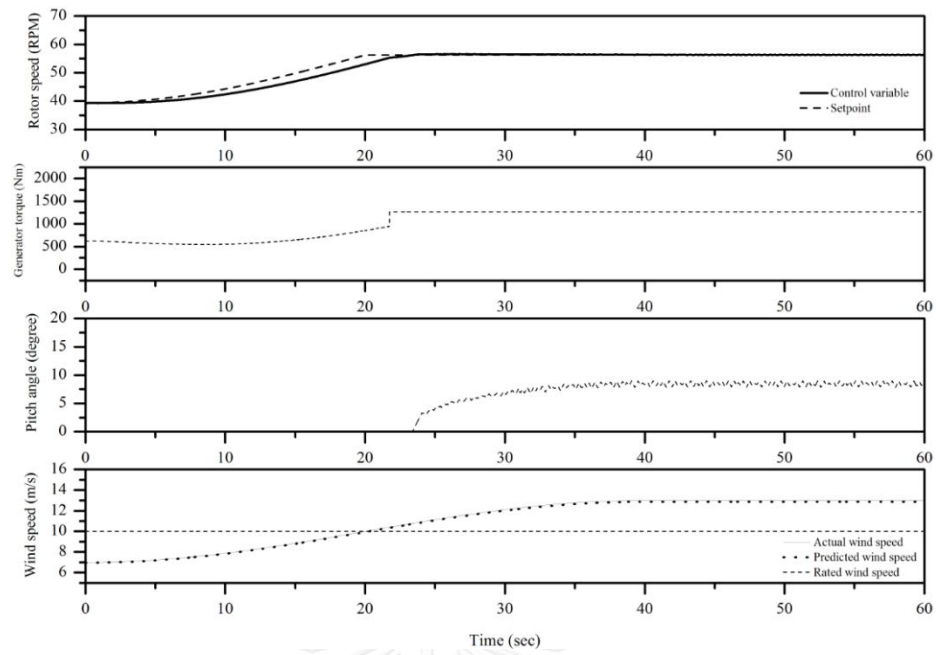
k_b	IAE
ไม่มีแอนตี้ไวน์ออฟ	5171.3
0.1	4374.4
0.3	4135.1
1.0	4215.6

ผลจากการทดลองพบว่า การติดตั้งตัวแอนตี้ไวน์ออฟสามารถช่วยลดผลตอบสนองที่ไม่ต้องการได้ เนื่องจากตัวแอนตี้ไวน์ออฟจะทำการนำผลต่างระหว่างมุมใบพัดที่คำนวณได้ก่อนและหลังผ่านขอบเขต กลับเข้าไปหักลบออกในเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมพีไอดี ทำให้เทอมอินทิกรัลไม่เกิดการไวน์ออฟขึ้นนั่นเอง โดยพบว่า k_b ที่ดีที่สุดคือ 0.3

นอกจากการทดลองควบคุมระบบกังหันลมกับลมที่มีพฤติกรรมทั่วไป งานวิจัยนี้ยังทำการทดสอบระบบการควบคุมดังกล่าวกับลมที่มีพฤติกรรมพิเศษ 2 ลักษณะ ได้แก่ ลมกระโชก (gust) และลมยกระดับ (rise up) เพื่อตรวจสอบว่าระบบควบคุมนี้ยังคงสามารถทำงานภายใต้สภาวะพิเศษเหล่านี้ได้หรือไม่ ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 พบว่าระบบการควบคุมข้างต้นยังคงทำงานได้ ปราศจากปัญหาใดๆ



รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมกรณีลมกระโชก (gust)



รูปที่ 5.25 ผลการควบคุมกรณีลมยกกระดืบ (rise up)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการทำนายความเร็วลมโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีของ Nanayakkara และวิธีของ Østergaard พบว่า วิธีของ Østergaard สามารถทำนายความเร็วลมได้ใกล้เคียงกับความเร็วลมจริงเป็นอย่างมาก มีความผิดพลาดน้อยกว่าความเร็วลมจากการวัด ตัวทำนายลมดังกล่าวจึงถูกใช้สำหรับประมาณความเร็วลมในการศึกษา

สำหรับการควบคุมในช่วงภาระบางส่วน สมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรถูกสร้างจากผลตอบสนองแบบสแต็ป สามารถเป็นตัวแทนของสมการแบบจำลองฟาสต์ได้ มีความผิดพลาดจากแบบจำลองของฟาสต์ 0.71 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำสมการเชิงเส้นพารามิเตอร์ผันแปรดังกล่าวไปใช้กับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทวนชนิดออฟไลน์ พบว่า สามารถควบคุมระบบกึ่งหั่นลมในช่วงภาระบางส่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลด IAE ได้ถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี นอกจากนี้การเปลี่ยนโหมดควบคุมระหว่างการควบคุมทอร์คและการควบคุมมุมใบพัดสามารถทำได้ดีหลังจากติดตั้งตัวแอนตี้ไวน์อัปชนิดคำนวณย้อนกลับ จึงทำให้ระบบการควบคุมที่ถูกรออกแบบในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้ตลอดช่วงดำเนินการ

รายการอ้างอิง

Abbas, F. A., M. A. Abdulsada and F. R. Abusief (2011). "Speed Control of Wind Turbine by Using PID Controller." Journal of Engineering & Technology 29(1): 65-71.

Bhowmik, S. and R. Spee (1998). Wind speed estimation based variable speed wind power generation. Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE.

Bianchi, F. D., R. J. Mantz and C. F. Christiansen (2005). "Gain scheduling control of variable-speed wind energy conversion systems using quasi-LPV models." Control Engineering Practice 13(2): 247-255.

Bumroongsri, P. and S. Kheawhom (2012). "An off-line robust MPC algorithm for uncertain polytopic discrete-time systems using polyhedral invariant sets." Journal of Process Control 22(6): 975-983.

Bumroongsri, P. and S. Kheawhom (2013). "Interpolation-based Off-line Robust MPC for Uncertain Polytopic Discrete-time Systems." Engineering Journal; Vol 18, No 1 (2014): Regular Issue.

Feng, G., X. Daping and L. Yuegang (2008). Pitch-control for large-scale wind turbines based on feed forward fuzzy-PI. Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on.

Inthamoussou, F. A., F. D. Bianchi, H. Battista and R. J. Mantz (2014). Gain Scheduled H_∞ Control of Wind Turbines for the Entire Operating Range. Wind Turbine Control and Monitoring. N. Luo, Y. Vidal and L. Acho. Cham, Springer International Publishing: 71-95.

Joffre, S. M. and T. Laurila (1988). "Standard Deviations of Wind Speed and Direction from Observations over a Smooth Surface." Journal of Applied Meteorology 27(5): 550-561.

Kothare, M. V., V. Balakrishnan and M. Morari (1996). "Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities." Automatica 32(10): 1361-1379.

Nanayakkara, N., M. Nakamura and H. Hatazaki (1997). "Predictive control of wind turbines in small power systems at high turbulent wind speeds." Control Engineering Practice 5(8): 1063-1069.

NREL (1998). "NWTTC AWT-26 Research and Retrofit Project - Summary of AWT-26/27 Turbine Research and Development."

Østergaard, K. Z., P. Brath and J. Stoustrup (2007). "Estimation of effective wind speed." Journal of Physics: Conference Series 75(1): 012082.

Singh, M., E. Muljadi, J. Jonkman, V. Gevorgian, I. Girsang and J. Dhupia (2014). "Simulation for Wind Turbine Generators—With FAST and MATLAB-Simulink Modules."

Sloth, C., T. Esbensen and J. Stoustrup (2011). "Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines." Mechatronics 21(4): 645-659.

Vishal, T. M., K. A. Rinal, K. P. Dhaval and A. J. Jitendra (2013). "Study of PID Controller Based Pitch Actuator System for Variable Speed HAWT using MATLAB." International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2(5): 1496-1504.

Wan, Z. and M. V. Kothare (2003). "An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities." *Automatica* 39(5): 837-846.

Yilmaz, A. S. and Z. Özer (2009). "Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks." *Expert Systems with Applications* 36(6): 9767-9775.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Q=200, R=0.1)

X _d	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)								
	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
-30	11.8	14.5	17.3	20.5	23.6	27.2	30.8	34.8	37.3
-25	14.1	17.4	20.7	24.5	28.4	32.7	37.0	37.3	37.3
-20	17.6	21.8	25.9	30.7	35.4	37.3	37.3	37.3	37.3
-15	23.5	29.0	34.5	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-10	35.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-8	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-6	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-4	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.2	37.3
-2	37.3	37.3	37.2	37.3	37.3	37.1	37.3	37.3	37.2
-1.8	37.3	37.3	37.3	37.2	37.3	37.3	37.1	37.3	37.3
-1.6	37.3	37.3	37.3	37.3	37.1	37.3	37.3	37.3	37.3
-1.4	37.3	37.3	36.8	37.1	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-1.2	37.3	37.3	37.1	37.3	37.1	37.3	37.3	37.3	37.3
-1	37.3	37.2	37.3	37.3	37.0	37.3	37.3	37.3	37.3
-0.8	37.3	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-0.6	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-0.4	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
-0.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
0.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
0.4	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
0.6	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
0.8	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.2
1	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.0
1.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
1.4	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.1	37.3
1.6	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.2
1.8	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.1	37.1	37.3
2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
4	37.3	37.3	37.3	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.3
6	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
8	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
10	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
15	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
20	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	31.7
25	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	35.0	30.2	25.4
30	37.3	37.3	37.2	37.3	36.4	32.8	29.2	25.2	21.2

ตารางที่ ก-2 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Q=200, R=0.01)

X _d	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)								
	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
-30	11.8	14.5	17.3	20.5	23.6	27.2	30.8	34.8	38.8
-25	14.1	17.4	20.7	24.5	28.4	32.7	37.0	41.8	46.6
-20	17.6	21.8	25.9	30.7	35.4	40.8	46.2	52.2	58.3
-15	23.5	29.0	34.5	40.9	47.3	54.4	61.6	69.6	77.7
-10	35.3	43.5	51.8	61.3	70.9	81.7	92.4	104.5	116.5
-8	44.1	54.4	64.8	76.7	88.6	102.1	115.5	130.6	133.2
-6	58.8	72.6	86.4	102.2	118.1	133.2	133.3	133.3	133.3
-4	88.2	108.9	129.5	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.2
-2	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.1	133.0	133.2
-1.8	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.2	133.2	133.2
-1.6	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.2	133.2	133.2	133.2
-1.4	133.3	133.3	133.3	133.3	133.2	133.3	133.2	133.2	133.3
-1.2	133.3	133.2	133.2	133.3	133.3	133.1	133.2	132.4	133.3
-1	133.2	133.2	133.3	133.3	133.1	133.2	133.3	132.2	133.3
-0.8	133.2	133.2	133.3	133.0	133.2	132.3	133.3	133.3	133.3
-0.6	133.3	133.2	133.2	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
-0.4	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
-0.2	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
0.2	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
0.4	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
0.6	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
0.8	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.2	133.2
1	133.3	133.3	133.3	133.3	132.4	133.3	133.2	133.1	133.3
1.2	133.3	133.3	133.3	132.5	132.5	133.2	133.2	133.3	133.0
1.4	132.6	133.1	133.3	132.6	133.3	133.2	133.2	133.2	133.3
1.6	133.0	132.9	133.3	133.2	133.2	133.2	132.9	133.3	133.3
1.8	132.9	132.7	133.2	133.2	133.2	133.3	133.2	133.3	133.3
2	132.8	133.3	133.3	133.3	133.2	133.2	133.3	133.3	133.3
4	133.2	133.2	133.2	133.2	133.2	133.3	133.3	133.3	133.3
6	133.2	133.2	133.3	133.3	133.3	133.3	133.2	125.9	105.8
8	133.3	133.3	133.3	133.2	133.2	122.9	109.5	94.4	79.4
10	133.2	132.9	128.2	118.6	109.1	98.3	87.6	75.5	63.5
15	96.5	91.0	85.5	79.1	72.7	65.6	58.4	50.4	42.3
20	72.4	68.2	64.1	59.3	54.6	49.2	43.8	37.8	31.8
25	57.9	54.6	51.3	47.5	43.6	39.3	35.0	30.2	25.4
30	48.2	45.5	42.7	39.6	36.4	32.8	29.2	25.2	21.2

ตารางที่ ก-3 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคงทน (Q=200, R=0.001)

X _d	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)								
	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
-30	11.8	14.5	17.3	20.5	23.6	27.2	30.8	34.8	38.8
-25	14.1	17.4	20.7	24.5	28.4	32.7	37.0	41.8	46.6
-20	17.6	21.8	25.9	30.7	35.4	40.8	46.2	52.2	58.3
-15	23.5	29.0	34.5	40.9	47.3	54.4	61.6	69.6	77.7
-10	35.3	43.5	51.8	61.3	70.9	81.7	92.4	104.5	116.5
-8	44.1	54.4	64.8	76.7	88.6	102.1	115.5	130.6	145.6
-6	58.8	72.6	86.4	102.2	118.1	136.1	154.0	174.1	194.2
-4	88.2	108.9	129.5	153.4	177.2	204.1	231.1	261.2	291.2
-2	176.3	217.7	259.1	306.7	354.4	408.3	435.8	436.4	436.5
-1.8	195.9	241.9	287.9	340.8	393.7	435.4	436.5	436.5	436.5
-1.6	220.4	272.1	323.9	383.4	435.6	436.6	436.4	436.5	436.5
-1.4	251.9	311.0	370.1	433.9	436.6	436.4	436.6	436.6	436.3
-1.2	293.9	362.9	430.3	436.5	436.4	436.5	436.6	436.2	436.0
-1	352.7	433.9	436.4	436.3	436.5	436.6	436.2	436.6	436.6
-0.8	435.5	436.5	436.2	436.5	436.6	436.6	436.6	436.6	436.4
-0.6	436.4	436.6	436.6	435.8	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6
-0.4	436.6	436.4	436.6	436.2	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6
-0.2	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6
0.2	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6
0.4	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.1
0.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.6	436.1	436.4	436.6	436.0
0.8	436.6	436.1	436.2	436.4	436.5	436.6	436.6	435.9	436.5
1	436.4	436.5	436.6	435.0	435.8	436.4	436.0	436.5	436.2
1.2	434.6	435.3	435.8	435.9	436.4	436.1	436.6	436.3	436.3
1.4	436.3	436.5	435.6	436.4	436.2	436.6	436.6	436.6	435.7
1.6	436.5	436.5	436.4	436.5	436.5	436.4	436.5	435.9	396.8
1.8	436.5	436.5	436.0	436.6	436.5	436.4	436.3	419.6	352.7
2	436.5	436.1	436.0	436.6	436.5	436.4	434.7	377.6	317.5
4	361.8	341.1	320.4	296.6	272.8	245.9	218.9	188.8	158.7
6	241.2	227.4	213.6	197.7	181.9	163.9	145.9	125.9	105.8
8	180.9	170.6	160.2	148.3	136.4	122.9	109.5	94.4	79.4
10	144.7	136.5	128.2	118.7	109.1	98.3	87.6	75.5	63.5
15	96.5	91.0	85.5	79.1	72.7	65.6	58.4	50.4	42.3
20	72.4	68.2	64.1	59.3	54.6	49.2	43.8	37.8	31.8
25	57.9	54.6	51.3	47.5	43.6	39.3	35.0	30.2	25.4
30	48.2	45.5	42.7	39.6	36.4	32.8	29.2	25.2	21.2

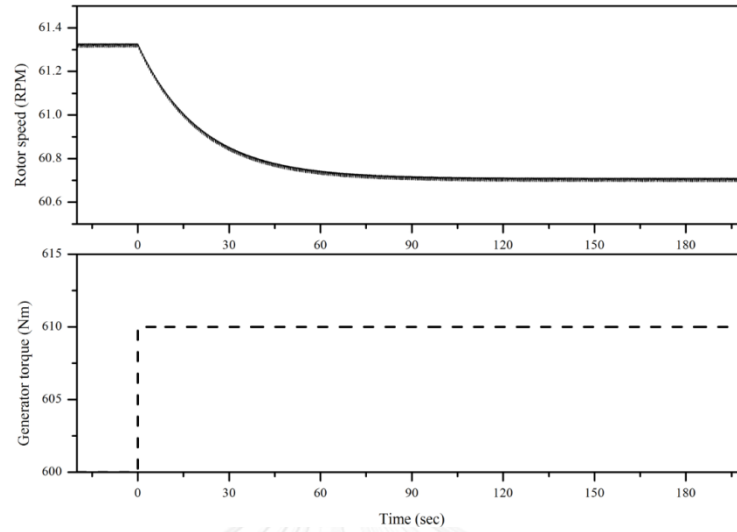
ตารางที่ ก-4 ค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้สำหรับตัวควบคุมพีไอดีในช่วงภาระบางส่วน

แบบที่	ค่าพารามิเตอร์การจูน (tuning parameter)	
	K_c	τ_i
1 ($\tau_c=10$)	-33.94	30
2 ($\tau_c=4$)	-84.84	16
3 ($\tau_c=1$)	-339.37	4

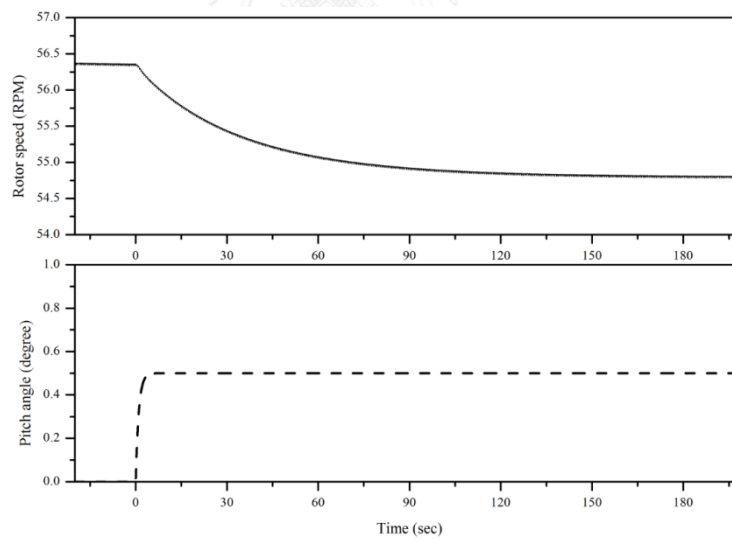
ตารางที่ ก-5 ค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้สำหรับตัวควบคุมพีไอดีในช่วงภาระเต็ม

แบบที่	ค่าพารามิเตอร์การจูน (tuning parameter)	
	K_c	τ_i
1 ($\tau_c=5$)	-2.19	20
2 ($\tau_c=1$)	-10.92	4
3 ($\tau_c=0.5$)	-21.85	2

ภาคผนวก ข



รูปที่ ข-1 ผลตอบสนองแบบสแต็ปสำหรับช่วงภาระบางส่วน



รูปที่ ข-2 ผลตอบสนองแบบสแต็ปสำหรับช่วงภาระเต็ม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชัยชนะนันต์ ตั้งสัมพันธ์ ปัจจุบันอายุ 24 ปี เกิดวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2556 ระหว่างศึกษาได้รับพระราชทานเหรียญรางวัลการศึกษาดีเด่นจากกองทุนสมเด็จพระบรมโอรสาธิราชฯ สยามมกุฎราชกุมาร ณ วันที่ 18 มีนาคม พ.ศ. 2557 ต่อมาในปีการศึกษา 2557 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้เข้าร่วมกับกลุ่มวิจัยด้านการควบคุมกระบวนการ

