



**ELECTRICAL
ENGINEERING**
SINCE 1929
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**รายงานวิชา 2100301
การฝึกงานวิศวกรรม (ENGINEERING PRACTICE)**

จัดทำโดย

นาย ชยุต ธนกิจโกเศรษฐ์
รหัสประจำตัว 6430068221
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน่วยงานที่ฝึกงาน

KPIT Tech (Thailand) Co., Ltd.
44/1 อาคารรุ่งโรจน์ธนกกุล 14th Floor ถนนรัชดาภิเษก
แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310

วิศวกรผู้ดูแล

กวินภพ จิโน, เจนณรงค์ กล่อมเกลา
Lead Software Engineer, Senior Technical Leader

ช่วงระยะเวลาการฝึกงาน

ตั้งแต่วันที่ 20/5/2024
ถึงวันที่ 9/8/2024

รวมระยะเวลาการฝึกงาน

12 สัปดาห์ 56 วัน 449 ชั่วโมง

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

คำนำ

รายงานนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของวิชา 2100301 การฝึกงานวิศวกรรม (Engineering Practice) ซึ่งผู้จัดทำได้มีโอกาสเข้ารับการฝึกงานกับ บริษัท KPIT Tech (Thailand) Co., Ltd. ในทีม Hardware in the Loop (HIL) โดยผู้จัดทำได้เรียนรู้การใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK ในการสร้างโมเดลของมอเตอร์แบบต่างๆที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า จำลองและความคุมการทำงานของมอเตอร์ดังกล่าวโดยใช้ความรู้ด้าน controller เข้ามาประยุกต์ใช้ รวมทั้งได้มีโอกาสนำเสนอผลงานให้กับทีมภายในบริษัทเช่นกัน โดยรายงานนี้จะแบ่งออกเป็น 4 บท ได้แก่ บทนำ รายละเอียดของบริษัทที่เข้าร่วมฝึกงาน รายละเอียดของงาน และบทสรุป

ทั้งนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณ บริษัท KPIT Tech (Thailand) Co., Ltd. ที่ได้มอบโอกาสการเรียนรู้การทำงานในฐานะวิศวกรภายในบริษัท และขอขอบคุณ คุณกวิณภพ จิโน และ คุณเจนณรงค์ กล่อมเกลา ผู้ดูแลการฝึกงานตลอดระยะเวลา 3 เดือน รวมทั้งพี่ๆพนักงานทุกคนในบริษัทที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยดูแล และสร้างบรรยากาศการทำงานที่ดีตลอดช่วงเวลาฝึกงาน ผู้จัดทำหวังว่ารายงานฉบับนี้จะให้ประโยชน์แก่ผู้อ่านทุกท่าน และหากมีข้อเสนอแนะหรือข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

(ชยุต ธนกิจโกเศรษฐ์)

นิสิตฝึกงาน

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการฝึกงาน	1
1.2 ช่วงเวลาการฝึกงาน	1
1.3 สภาพการทำงานระหว่างฝึกงาน	1
1.4 ผู้ควบคุมดูแลการฝึกงาน	1
บทที่ 2 รายละเอียดของบริษัทที่เข้าฝึกงาน	2
2.1 ที่ตั้งและข้อมูลการติดต่อ	2
2.2 ประวัติโดยย่อ	2
2.3 ลักษณะงานโดยรวม	2
2.4 ระบบบริหาร	3
บทที่ 3 รายละเอียดงาน	4
3.1 ความรู้พื้นฐาน	4
3.1.1 มอเตอร์ในอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า	4
3.1.2 PID CONTROLLER	4
3.2 ออกแบบ CONTROLLER-PLANT MODEL สำหรับ DC MOTOR	6
3.2.1 ศึกษาหลักการทำงานพื้นฐานของ DC MOTOR	6
3.2.2 ออกแบบ TORQUE CONTROL DC MOTOR	7
3.2.3 ออกแบบ SPEED CONTROL DC MOTOR	8
3.3 CONTROLLER-PLANT MODEL OF SPMSM	12
3.3.1 ศึกษาการทำงานเบื้องต้นของ SPMSM	12
3.3.2 PLANT MODEL OF SPMSM	14

3.3.3 TORQUE CONTROL MODEL OF SPMSM	16
3.3.4 SPEED CONTROL MODEL OF SPMSM	18
3.3.5 SPEED CONTROL MODEL OF SPMSM WITH DECOUPLING CONTROL	20
บทที่ 4 สรุป	22
4.1 ประโยชน์ที่ได้รับจากการฝึกงาน	22
4.2 ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ	22
เอกสารอ้างอิง (ถ้ามี)	23
ภาคผนวก	

บทที่ 1 บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ของการฝึกงาน

1. เพื่อนำความรู้ที่ได้เรียนมาปรับใช้ในชีวิตการทำงานจริง
2. เพื่อเรียนรู้การทำงานในฐานะวิศวกรมืออาชีพ
3. เพื่อฝึกให้มีความรับผิดชอบต่อนหน้าที่ เคารพระเบียบวินัยและกฎต่างๆในบริษัท
4. เพื่อฝึกฝนการทำงานร่วมกับผู้อื่น
5. เพื่อเป็นแนวทางการเลือกประกอบอาชีพของนิสิตต่อไปหลังสำเร็จการศึกษา

1.2 ช่วงเวลาการฝึกงาน

เริ่มตั้งแต่วันที่ 20 พฤษภาคม 2564 จนถึงวันที่ 9 สิงหาคม 2564 โดยทำงานทุกวันจันทร์ถึงศุกร์ รวมทั้งสิ้นเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ 56 วัน 449 ชั่วโมง

1.3 สภาพการทำงานระหว่างฝึกงาน

เข้าฝึกงานที่สำนักงานบริษัทสาขาประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ที่ 44/1 อาคารรุ่งโรจน์ธนกุล 14th Floor ถนนรัชดาภิเษก แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310 ซึ่งไม่ได้กำหนดเวลาเข้าและออกงานอย่างเฉพาะเจาะจง แต่ต้องเข้าก่อน 10 โมงเช้า และออกจากบริษัทหลัง 4 โมงเย็น และทำงานให้ครบ 8 ชั่วโมงไม่รวมเวลาพักเที่ยง โดยพี่ที่ดูแลการฝึกงานจะให้หัวข้อมาเรียนรู้ และจะมีนัดอัปเดตความคืบหน้าอาทิตย์ละ 2 ครั้ง แต่ถ้าระหว่างทำงานเจอปัญหาหรือมีคำถาม ก็สามารถถามพี่ๆได้ตลอดเวลา และพอจบแต่ละโปรเจกต์ ก็จะมีโอกาสได้เข้าร่วม monthly meeting เพื่อนำเสนองานที่ทำสำเร็จ

1.4 ผู้ควบคุมดูแลการฝึกงาน

นาย กวินภพ จิโน (Lead Software Engineer) และ นาย เจนณรงค์ กล่อมเกลา (Senior Technical Leader)

บทที่ 2 รายละเอียดของหน่วยงานที่เข้าฝึกงาน

2.1 สถานที่ตั้งและข้อมูลการติดต่อ

ชื่อหน่วยงาน : KPIT Tech (Thailand) Co., Ltd.

สถานที่ตั้ง : 44/1 อาคารรุ่งโรจน์ธนกุล 14th Floor ถนนรัชดาภิเษก แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง
กรุงเทพมหานคร 10310

เบอร์โทรศัพท์ : 02-153-9392

อีเมล : Info.Thailand@kpit.com

2.2 ประวัติโดยย่อ

บริษัท KPIT Tech (Thailand) ก่อตั้งขึ้นในปีพ.ศ. 2548 โดยเริ่มแรกใช้ชื่อ ThaiGerTec ซึ่งเป็นบริษัทที่เกิดจากความร่วมมือกันระหว่างไทย-เยอรมัน ในฐานะบริษัทพัฒนาและวิจัยยานยนต์ ต่อมาในปีพ.ศ. 2562 ได้มีการควบรวมบริษัทกับ KPIT Tech ซึ่งเป็นบริษัทพัฒนาซอฟต์แวร์ชั้นนำ โดยมีเป้าหมายในการพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่อนาคตที่สะอาด ชาญฉลาด และปลอดภัย รวมทั้งได้เปลี่ยนมาใช้ชื่อเป็น KPIT Tech สาขาประเทศไทยในภายหลัง

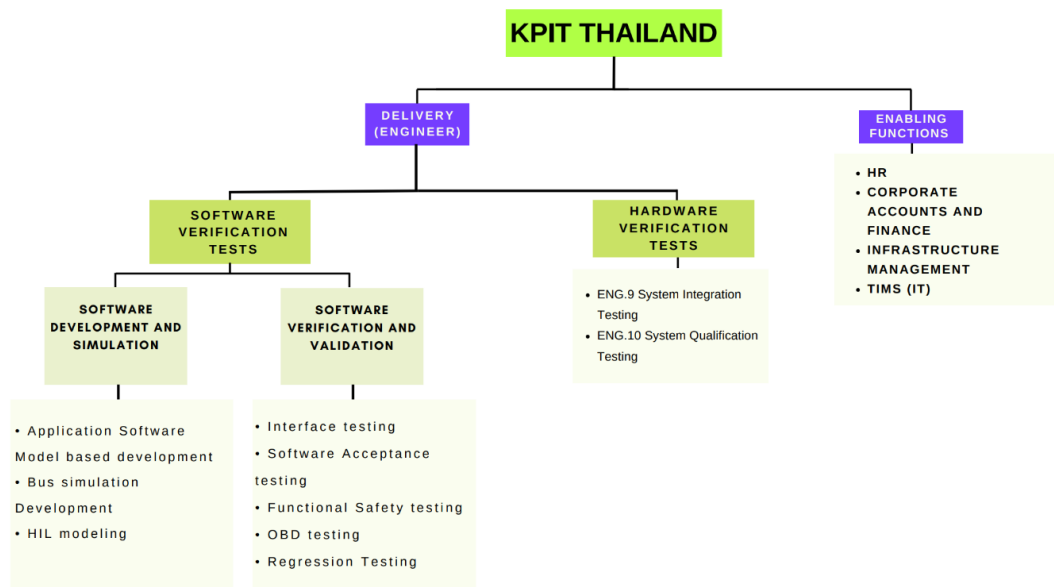
2.3 ลักษณะงานโดยรวม

บริษัท KPIT มีขอบเขตงานในการพัฒนาระบบฝังตัวในยานยนต์เพื่อรองรับบริษัทยานยนต์ทั้งในเอเชียและยุโรป โดยจะแบ่งหลักๆออกทั้งหมดเป็น 6 โดเมน ซึ่งแต่ละสาขาของทางบริษัททั่วโลกจะรับผิดชอบโดเมนที่แตกต่างกัน โดยโดเมนทั้ง 6 ของบริษัท KPIT ได้แก่

1. Autonomous Driving
2. Powertrain (Electric + Conventional)
3. Connected Vehicles
4. AUTOSAR (Adaptive & Classic)
5. Vehicle Diagnostics
6. Vehicle Engineering & Design

โดยสำหรับ KPIT Thailand จะมีส่วนร่วมใน 2 โดเมนได้แก่ Powertrain ซึ่งรับผิดชอบระบบขับเคลื่อนภายในของรถยนต์ไฟฟ้า และ AUTOSAR ซึ่งรับผิดชอบการออกแบบ software ไมโครชิปสำหรับการทำงานภายในรถยนต์ไฟฟ้า

2.4 ระบบบริหาร



รูปที่ 0 : ระบบบริหารของ KPIT Tech (Thailand)

บทที่ 3 รายละเอียดงาน

3.1 ความรู้พื้นฐาน

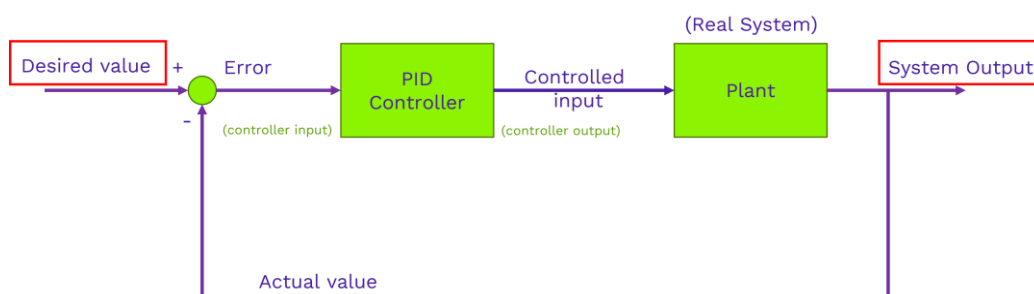
3.1.1 มอเตอร์ในอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า

อุตสาหกรรมรถยนต์ในปัจจุบันกำลังเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ยุคของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหลากหลายปัจจัย เช่น ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ความเชื่อมั่นในอุตสาหกรรม EV ที่เพิ่มมากขึ้น การผสมรวมกับเทคโนโลยีที่ทันสมัย และการลดภาระค่าใช้จ่ายในระยะยาว เป็นต้น โดยความแตกต่างเบื้องต้นของรถยนต์ EV และรถยนต์สันดาปทั่วไปคือรูปแบบพลังงานตั้งต้นที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ ดังนั้นมอเตอร์ในการขับเคลื่อนรถ EV จึงมีความสำคัญอย่างมากในการทำงานของรถ

มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเชิงกลสำหรับขับเคลื่อนล้อรถ โดยมอเตอร์เป็นส่วนประกอบหนึ่งของระบบส่งกำลังรถยนต์ (Powertrain System) ซึ่งประกอบด้วยหลากหลายส่วน อาทิเช่น ชุดแบตเตอรี่ มอเตอร์ ชุดควบคุมยานยนต์ (VCU) และ อุปกรณ์แปลงกระแส (AC-DC Converter) เป็นต้น โดยเป้าหมายของการใช้งานมอเตอร์ คือการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อควบคุมให้ได้ผลลัพธ์ของความเร็วรถ และแรงบิดล้อรถที่แตกต่างกันตามที่ต้องการ

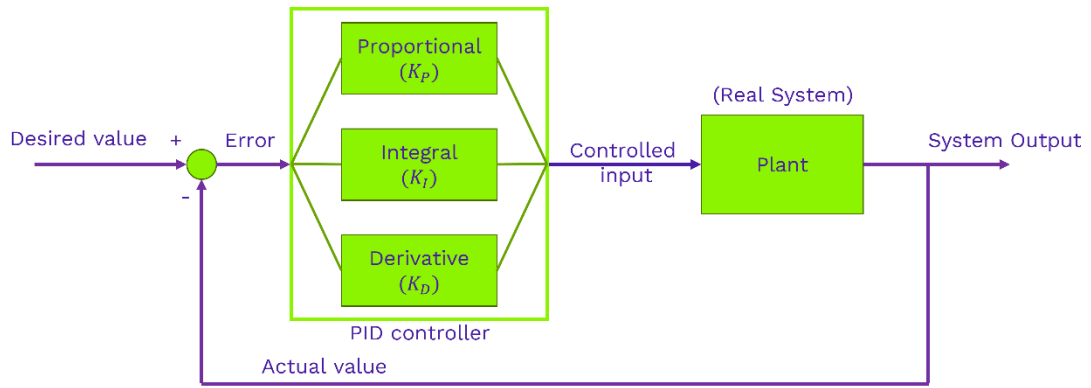
3.1.2 PID Controller

ระบบควบคุมแบบ PID (PID Controller) [1] คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยการนำค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณขาออกและค่าที่ต้องการมาคำนวณ โดยการปรับสัญญาณขาเข้าเพื่อลดค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุด โดยประโยชน์ของการใช้ระบบควบคุมคือสามารถใช้เป็นตัวแทนของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้า และสัญญาณขาออกได้โดยไม่ต้องทราบสมการแทนความสัมพันธ์นั้นๆ



รูปที่ 1 : แผนภาพระบบควบคุมเบื้องต้น

โดยวิธีการคำนวณของ PID Controller จะขึ้นกับตัวแปร 3 สัดส่วนได้แก่ Proportional (K_P) Integral (K_I) และ Derivative (K_D) ซึ่งค่าแต่ละส่วนจะส่งผลต่อการตอบสนองที่แตกต่างกันและจำเป็นต้องปรับจนให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสม



รูปที่ 2 : แผนภาพองค์ประกอบของระบบควบคุมแบบ PID

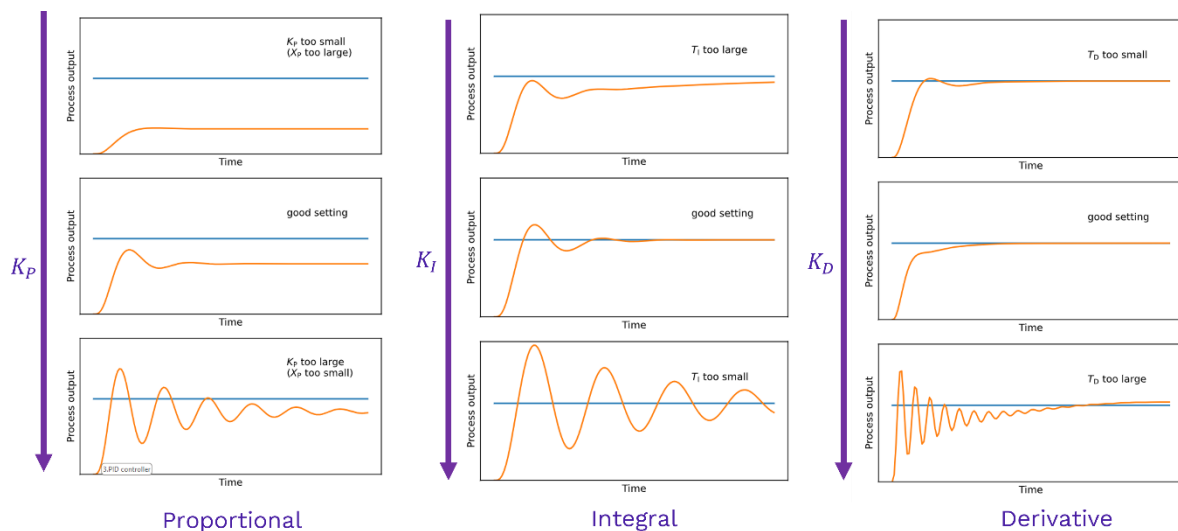
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

สมการสัญญาณขาออกของ PID Controller

Proportional เป็นสัดส่วนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด ทำหน้าที่เป็นอัตราขยายเพื่อคูณค่าความผิดพลาดให้ผลตอบแทนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ อัตราขยายที่เยอะจะส่งผลให้ผลตอบแทนใกล้เคียงที่ต้องการมากขึ้น แต่ถ้าอัตราขยายเยอะเกินไปจะส่งผลให้ระบบไม่เสถียร

Integral เป็นสัดส่วนที่จะมีผลเร่งให้ระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการ และกำจัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่วง steady state แต่ถ้าหาก K_I มีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้เกิด overshoot ขึ้นได้

Derivative เป็นส่วนที่จะช่วยลด overshoot ที่เกิดขึ้น และช่วยให้มีเสถียรภาพมากขึ้น แต่ถ้า K_d มากเกินไปอาจส่งผลให้ระบบไม่เสถียร

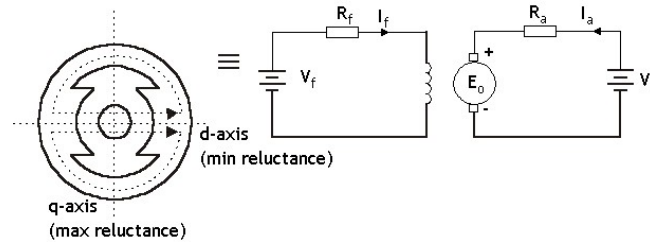


รูปที่ 3 : ผลตอบสนองจากการปรับเปลี่ยนค่าของ PID [2]

3.2 ออกแบบ Controller-Plant model สำหรับ DC motor

3.2.1 ศึกษาหลักการทํางานพื้นฐานของ DC motor

DC motor เป็นมอเตอร์พื้นฐานที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งใช้เป็น actuator สำหรับการทำงานที่ไม่ซับซ้อนมากนัก โดยมีองค์ประกอบหลักคือ stator ที่ใช้ field winding ในการควบคุม magnetic flux เพื่อหมุน rotor ซึ่งสามารถจำลอง DC motor ได้ด้วย Equivalent circuit [3] ดังรูปที่ 4

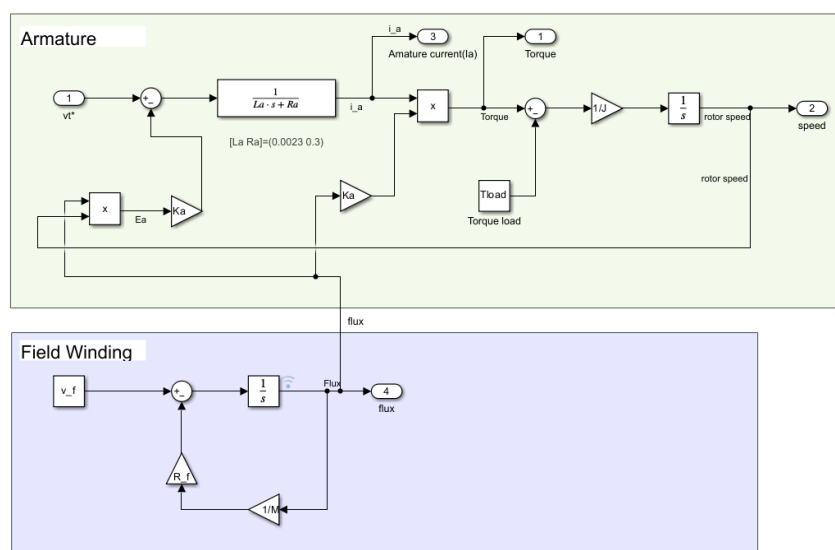


รูปที่ 4 : Equivalent circuit of DC motor

โดยโมเดลทางฝั่ง stator จะแทนด้วยวงจรด้าน Armature และโมเดล rotor จะแทนด้วยวงจร field winding ซึ่งเชื่อมกันด้วยความสัมพันธ์ของ Magnetic Flux [4] โดยมีสมการได้แก่

1. สมการพื้นฐาน $E_a = k\phi\omega$, $\tau = k\phi i_a$, $\phi = M i_f$, $\omega = \int \frac{1}{J}(\tau - \tau_{load})dt$
2. สมการ Armature $v_T = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a$
3. สมการ field winding $v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$

และจากสมการดังกล่าว จะสามารถนำมาสร้าง Plant Model ของ DC motor บนโปรแกรม MATLAB Simulink โดยมี Armature voltage เป็น input และ Rotor speed เป็น output ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 : Plant Model of DC motor

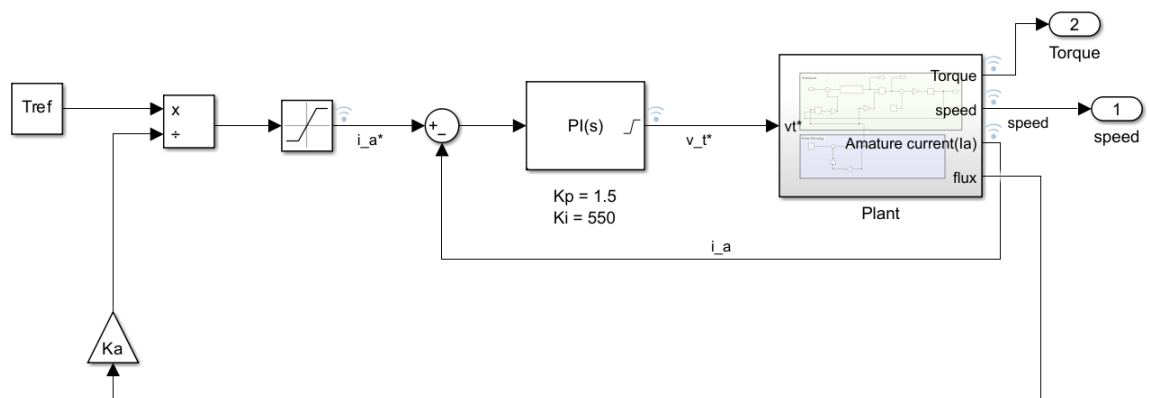
Table I DC Machine Rating and Parameters		
Rating and Parameter		Value Unit
Power		5.6 KW
Rated Speed	n_m^{rated}	2,500 rpm
Rated armature current	i_a^{rated}	27.0 A
Rated armature voltage	v_t^{rated}	230.0 V
Rated field current	i_f^{rated}	0.65 A
Rated field voltage	v_f^{rated}	240.0 V
Armature inductance	L_a	2.3 mH
Armature resistance	R_a	0.3 Ω
Field inductance	L_f	1.44 H
Field resistance	R_f	356.7 Ω
Mutual Inductance	M	1.304 H
Machine constant	k	1 -
Mechanical Inertia	J_{eq}	0.068 Kg. m ²

รูปที่ 6 : ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในโมเดล

เมื่อพิจารณา DC motor จะพบว่า output ของโมเดล 3 ค่า ได้แก่ 1. Torque 2. Rotor speed และ 3. Position โดยในทางปฏิบัติของ DC motor จะไม่ควบคุมตำแหน่งของ Motor เนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญได้

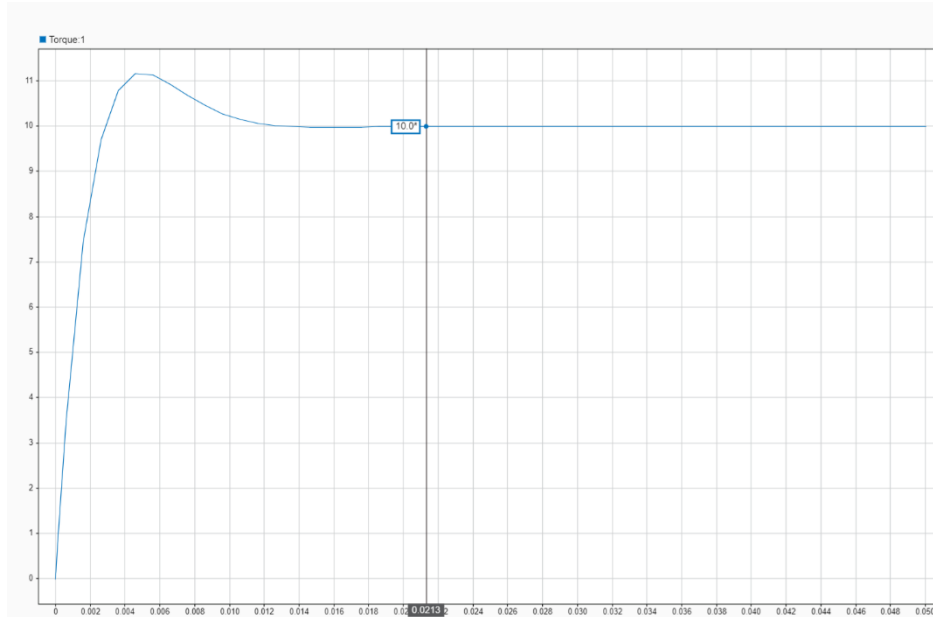
3.2.2 ออกแบบ Torque Control DC motor

การควบคุมแรงบิดของ Motor มักใช้ในระบบที่ต้องควบคุมให้แรงบิดมากกว่าโหลด โดยจะเป็นการควบคุมแรงบิดไปให้ถึง steady state มอเตอร์ซึ่ง Torque control model จะอาศัยความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสอาร์เมเจอร์ดังสมการ $\tau = k\phi i_a$ เพื่อควบคุม v_T ซึ่งเป็น input ของระบบผ่าน PI Controller จะได้ Controller-Plant model ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 : Torque control model

จากโมเดลข้างต้นกำหนดให้ $K_P = 1.5$ และ $K_I = 550$ สำหรับ PI controller ให้ $\tau_{load} = 10$ N*m และ $\tau_{ref} = 10$ N*m เป็นค่าของแรงบิดที่ต้องการควบคุมมอเตอร์ โดยที่เงื่อนไขของ steady state คือ $\tau_{load} = \tau_{ref}$

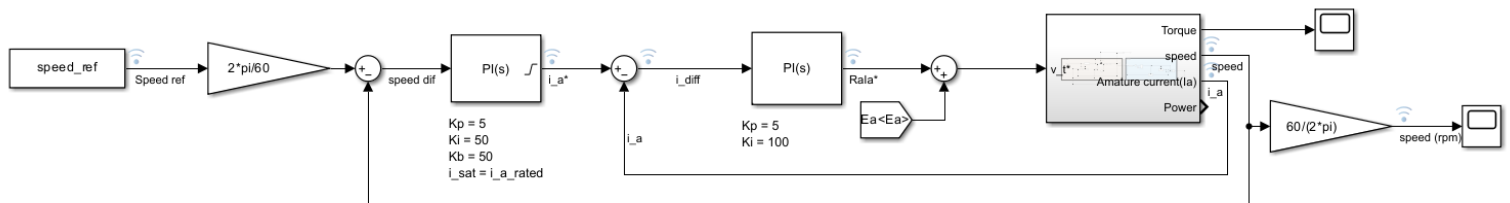


รูปที่ 8 : กราฟแสดงผลตอบสนองของแรงบิดมอเตอร์

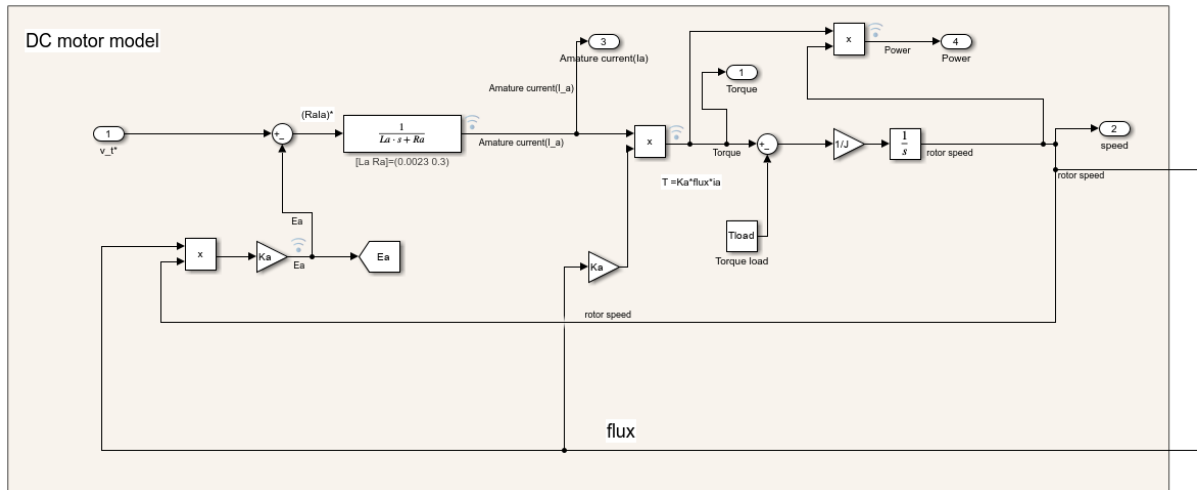
จากรูปที่ 8 จะสังเกตได้ว่า τ ของมอเตอร์จะถูกขับจาก 0 N*m ขึ้นไปจนถึง 10 N*m ซึ่งจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะ steady state ดังที่ต้องการได้

3.2.3 ออกแบบ Speed Control DC motor

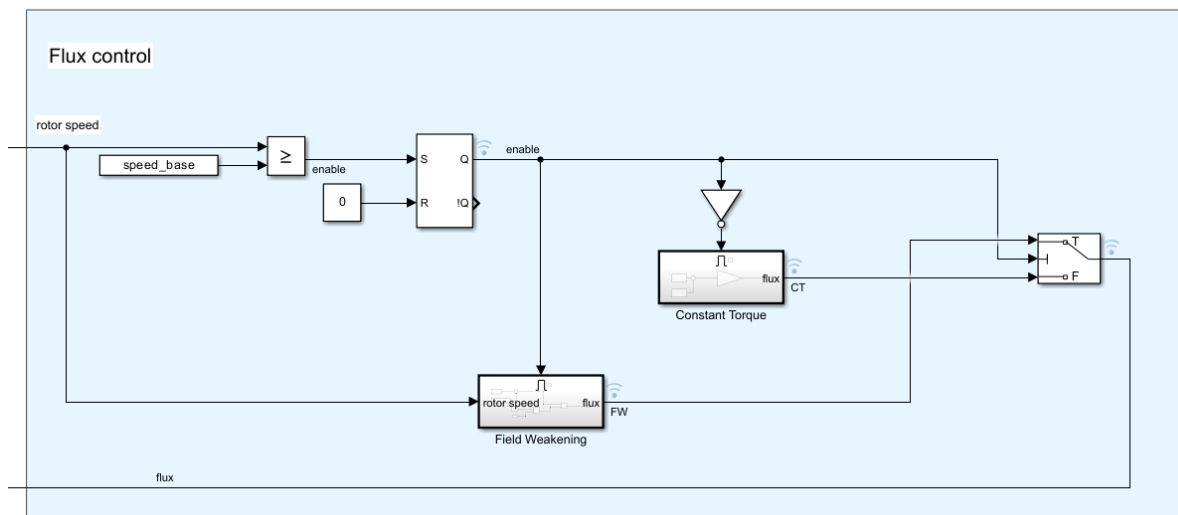
ในกรณีที่ระบบที่ต้องการใช้งานให้ความสำคัญกับความเร็ว เช่น การควบคุมความเร็วล้อรถ จะต้องสร้าง Controller-Plant model เพื่อ feedback ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ในปัจจุบันเพื่อนำไปควบคุมให้ได้ความเร็วที่ต้องการ โดยการควบคุมความเร็วจะมีข้อจำกัดของกำลังสูงสุดของมอเตอร์ดังสมการ $P_{max} = \tau\omega$ จึงทำให้เกิดเป็น 2 ช่วงการทำงานได้แก่ 1.Constant Torque คือช่วงที่ $P < P_{max}$ และ $\tau = \tau_{rated}$ จะสามารถควบคุมเพื่อเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ได้โดยตรง 2.Field Weakening [5] คือช่วงที่ $P = P_{max}$ และความเร็วสูงสุดขณะนั้นคือ ω_{base} โดยการจะเพิ่มความเร็วต่อไปได้จำเป็นต้องลดค่า τ ลงผ่านการลด magnetic flux จาก field winding



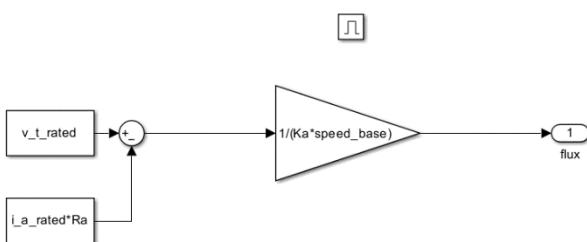
รูปที่ 9 : Controller-Plant model of Speed control DC motor



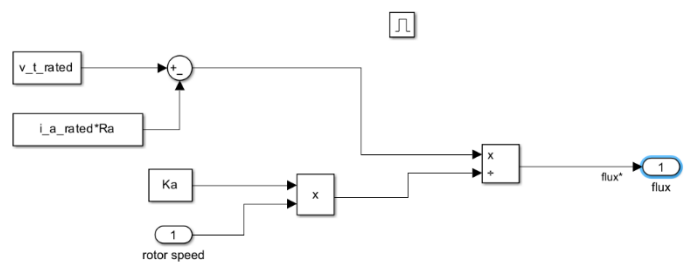
รูปที่ 10 : Plant model ในส่วน DC motor



รูปที่ 11 : Plant model ในส่วน flux control

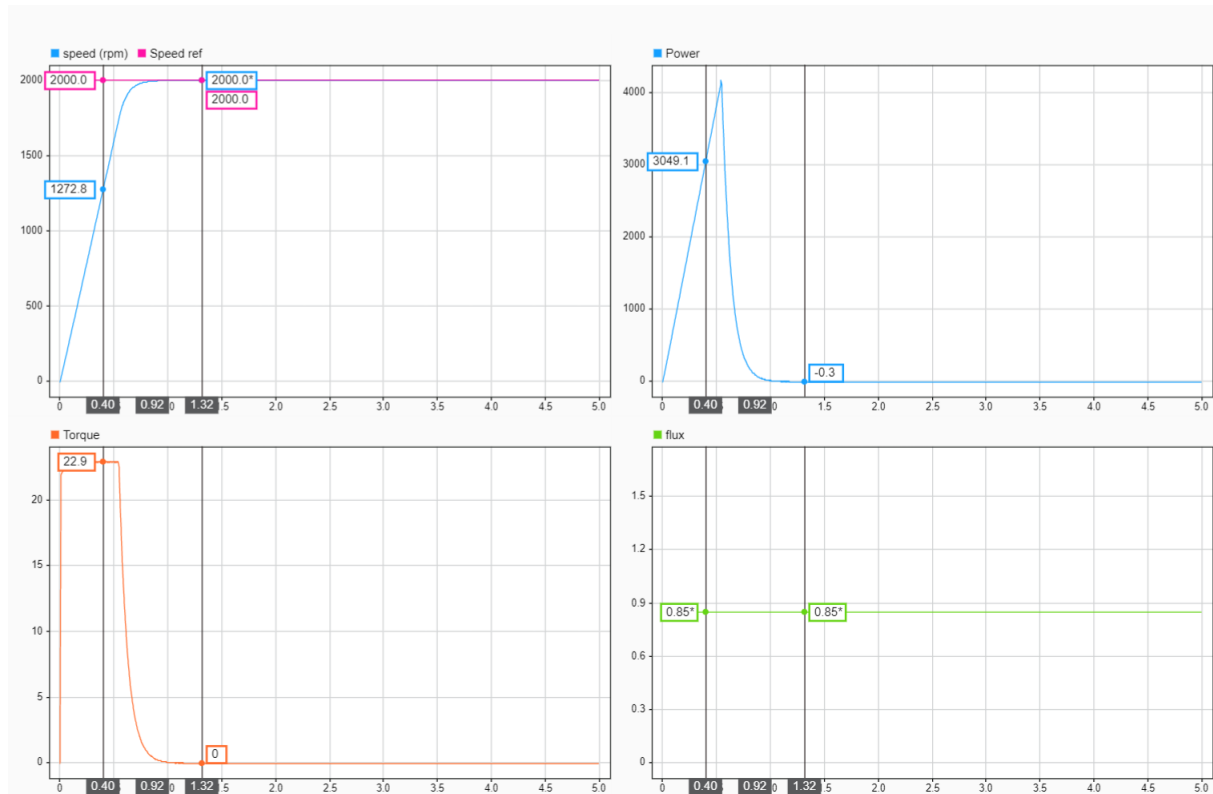


รูปที่ 12 : Constant Torque state



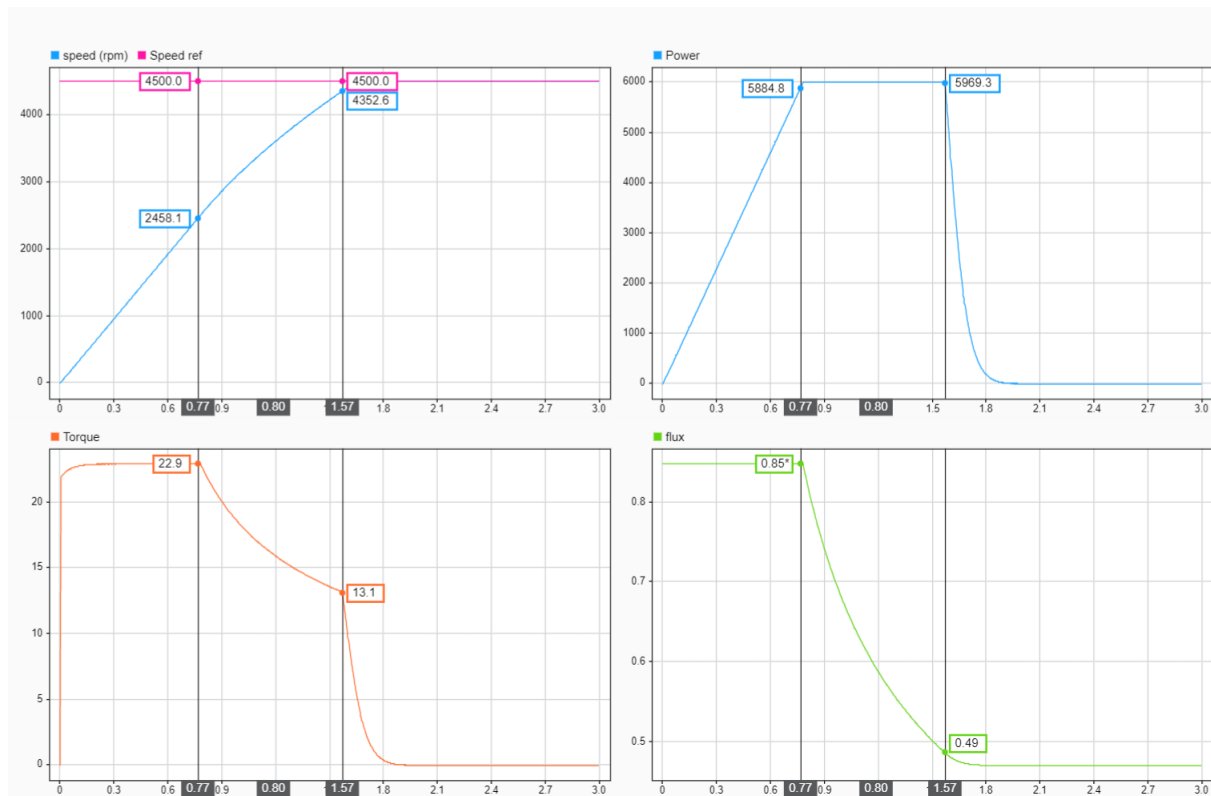
รูปที่ 13 : Field Weakening state

เมื่อกำหนดให้ $\omega_{base} = 2500 \text{ rpm} = 261.7994 \text{ rad/s}$ และ $P_{max} = 5995.2 \text{ W}$ ดังนั้นจึงจำลองการทำงานในช่วง Torque Constant Stage โดยให้ $\omega_{ref} = 2000 \text{ rpm} = 209.4 \text{ rad/s}$ ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 14 ซึ่งตรงตามทฤษฎี คือสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไปให้ถึงค่าที่ต้องการได้โดยใช้ flux และ Torque เป็นค่าคงที่โดยที่กำลังยังไม่เกินค่ากำลังสูงสุด และเมื่อความเร็วถึงค่าที่ต้องการมอเตอร์ก็จะเข้าสู่ steady state เพื่อคงความเร็วไว้โดย $\tau = \tau_{load} = 0 \text{ N.m}$



รูปที่ 14 : ผลตอบสนองในช่วง Torque constant speed control

เมื่อให้ $\omega_{ref} = 4500 \text{ rpm} = 471.2389 \text{ rad/s}$ ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า ω_{base} ระบบจะทำงานใน Field Weakening Stage เพื่อเพิ่มความเร็วไปให้ถึงโดยการลด Flux ลงดังผลลัพธ์ในรูปที่ 15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วมอเตอร์มากกว่า ω_{base} ระบบจะเข้าสู่ Field Weakening stage และเมื่อได้ความเร็วที่ต้องการระบบจะเข้าสู่ Steady State



รูปที่ 15 : ผลตอบสนองในช่วง Field Weakening speed control

3.3 Controller-Plant model of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor (SPMSM)

3.3.1 ศึกษาการทำงานเบื้องต้นของ SPMSM motor

SPMSM motor [6] คือมอเตอร์ชนิด brushless ซึ่งจะป้อนไฟกระแสสลับเข้าไปและอาศัยสนามแม่เหล็กในการหมุนมอเตอร์ โดยที่สนามแม่เหล็กถาวรของมอเตอร์ชนิดนี้จะอยู่ที่ด้านนอกของ rotor โดยที่หากพิจารณาความสัมพันธ์ในรูป 3 เฟส จะได้สมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l + L & -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & l + L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L & l + L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix}$$

Flux Linkage on windings

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

Induced Voltage

เพื่อความง่ายในการคำนวณ จำเป็นจะต้องกระแสและแรงดันจาก 3 เฟส (a, b, c) ให้กลายเป็น 2 เฟส (x, y) ด้วย Clarke Transform [7] ซึ่งเป็น transfer function ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

Clarke Transformation

อีกหนึ่งความซับซ้อนของมอเตอร์ 3 เฟสคือการพิจารณาองค์ประกอบเชิงมุม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทางฝั่ง stator และฝั่ง rotor ไม่ได้อยู่บนแกนอ้างอิงเดียวกัน จึงต้องทำการแปลงโดยอ้างอิงบน rotor reference frame ด้วย Park Transformation [8] จากแกน (x, y) ไปแกน (d, q) ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = e^{-j\theta} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Park Transformation

ซึ่งจะการแปลงทั้งสองชนิดนี้จะช่วยลดความซับซ้อนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L_s \\ \omega L_s & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda \end{bmatrix}$$

v-i relationship in dq-axis

นอกจากนี้การทราบค่าพารามิเตอร์ในแกน Direct Magnetic Axis (d) , Quadrature Magnetic Axis(q) จะช่วยในการสร้างโมเดลและควบคุมได้ง่ายยิ่งขึ้น เมื่อเราสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยตรงผ่าน i_q ดังสมการ

$$\tau = 1.5P[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

สมการความสัมพันธ์ของแรงบิด

และเมื่อ $P = \text{Pole}$ ของมอเตอร์ และสำหรับ SPMSM นั้น $L_d = L_q$ จึงทำให้ได้สมการอย่างง่ายดังนี้

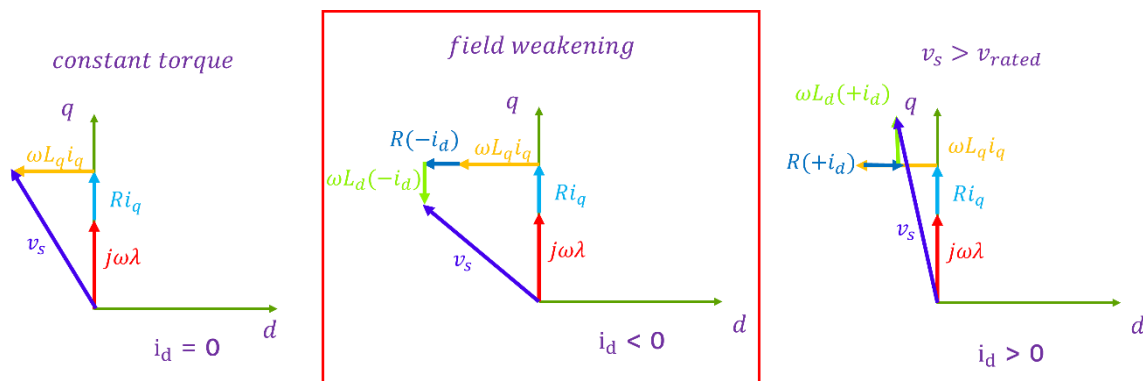
$$\tau = 1.5P\lambda i_q, \quad \omega = \int \frac{1}{J}(\tau - \tau_{load})dt$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง τ , i_q และ ω ของมอเตอร์ SPMSM

ซึ่งเราจะสามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วโดยตรงจากการควบคุม i_q เมื่อกำหนดให้ $i_d = 0$ ซึ่งเรียกว่า Torque Constant state แต่ในการควบคุมความเร็วของ SPMSM จะมีข้อจำกัดของแรงดันสูงสุดที่สามารถป้อนให้มอเตอร์ได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\|v_s\| = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad \text{เมื่อ} \quad \begin{aligned} v_d &= Ri_d - \omega L_q i_q \\ v_q &= Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \lambda \end{aligned}$$

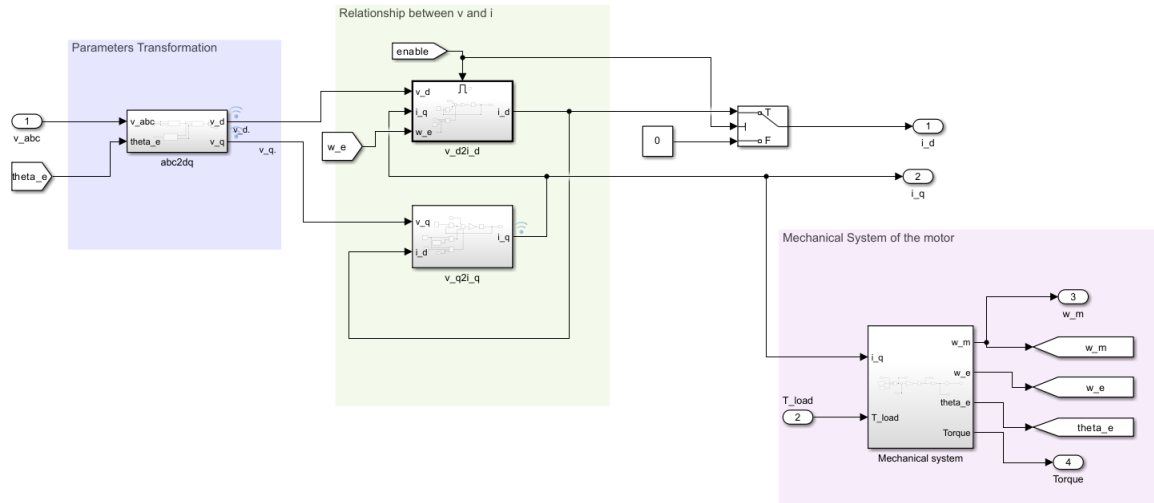
จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มความเร็วเชิงมุม(ω) ในกรณีที่ $i_d = 0$ จะแปรผันตรงกับ v_d และ v_q ทำให้ $\|v_s\|$ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันสูงสุดซึ่งจะเป็นกำหนดความเร็วสูงสุดของมอเตอร์(ω_{base}) อย่างไรก็ตามเราสามารถขับความเร็วไปให้มากกว่า ω_{base} ได้โดยการปรับค่า i_d เพื่อมาชดเชย โดยจากรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาสมการในรูปแบบของ vector การลด $i_d < 0$ จะทำให้ $\|v_s\|$ มีค่าน้อยกว่า $v_{s,rated}$ ซึ่งเรียกว่า Field Weakening state [9]



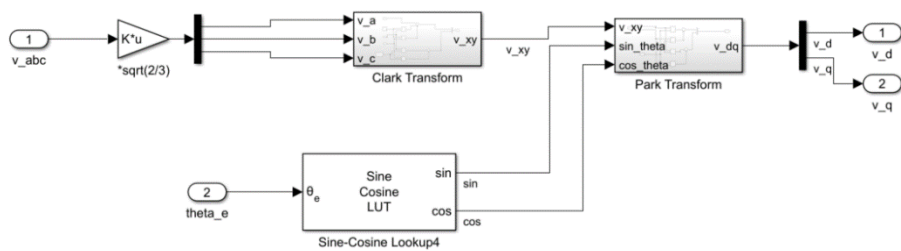
รูปที่ 16 : vector analyzing ของ i_d

3.3.2 Plant Model of SPMSM

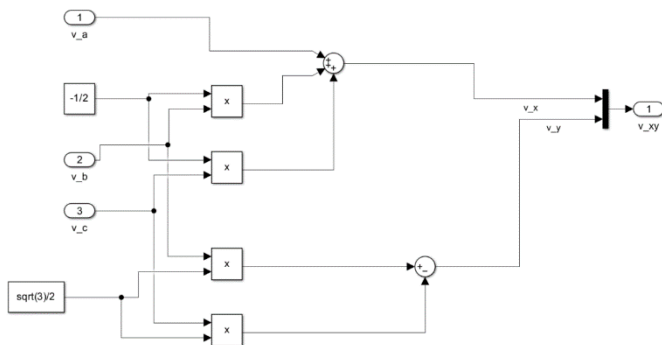
การควบคุมมอเตอร์ในทางปฏิบัติ จะป้อนสัญญาณแรงดัน 3 เฟสเป็นอินพุตของมอเตอร์ โดยมีสัญญาณเอ้าท์พุตเป็น แรงบิด ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ และ ตำแหน่งเชิงมุม ซึ่งสามารถสร้างออกมาเป็น Plant model บน Simulink ได้ดังรูปที่ 17-20



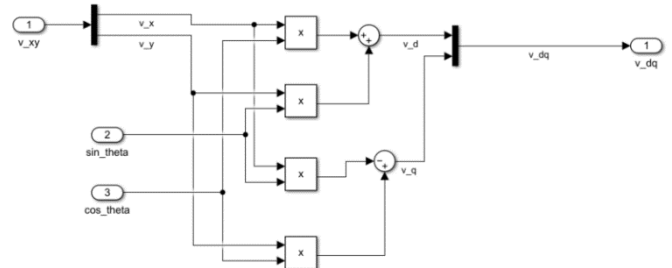
รูปที่ 17 : Plant Model of SPMSM motor



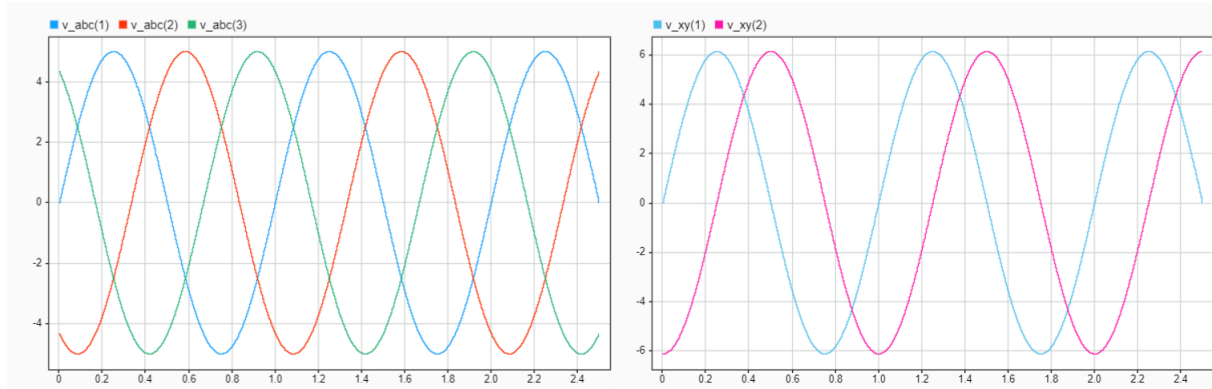
รูปที่ 18 : abc2dq subsystem (Parameters transformation)



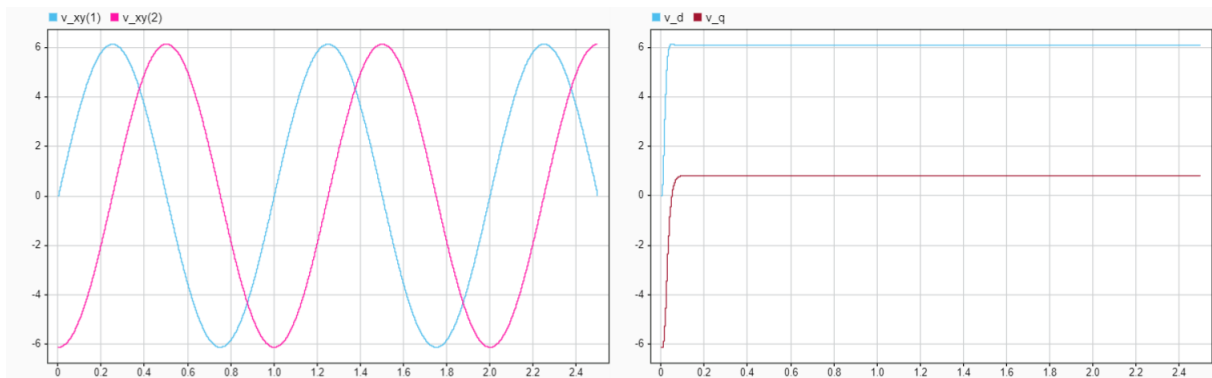
รูปที่ 18.1 : Clarke Transformation



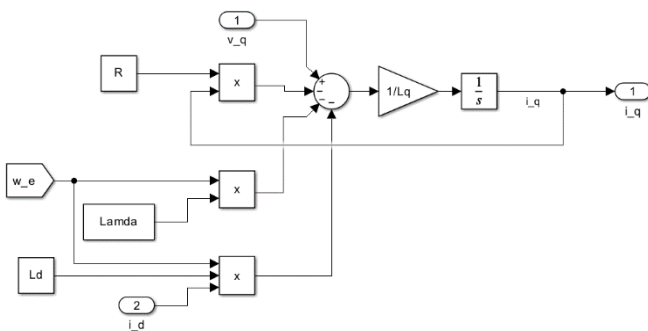
รูปที่ 18.2 : Park Transformation



รูปที่ 18.3 : ผลการแปลง Clarke Transformation

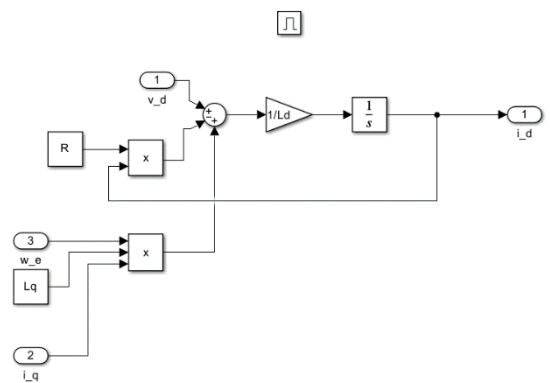


รูปที่ 18.4 : ผลการแปลง Park Transformation



รูปที่ 19.1 : การแปลง v_d เป็น i_d

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P \omega_m i_q$$

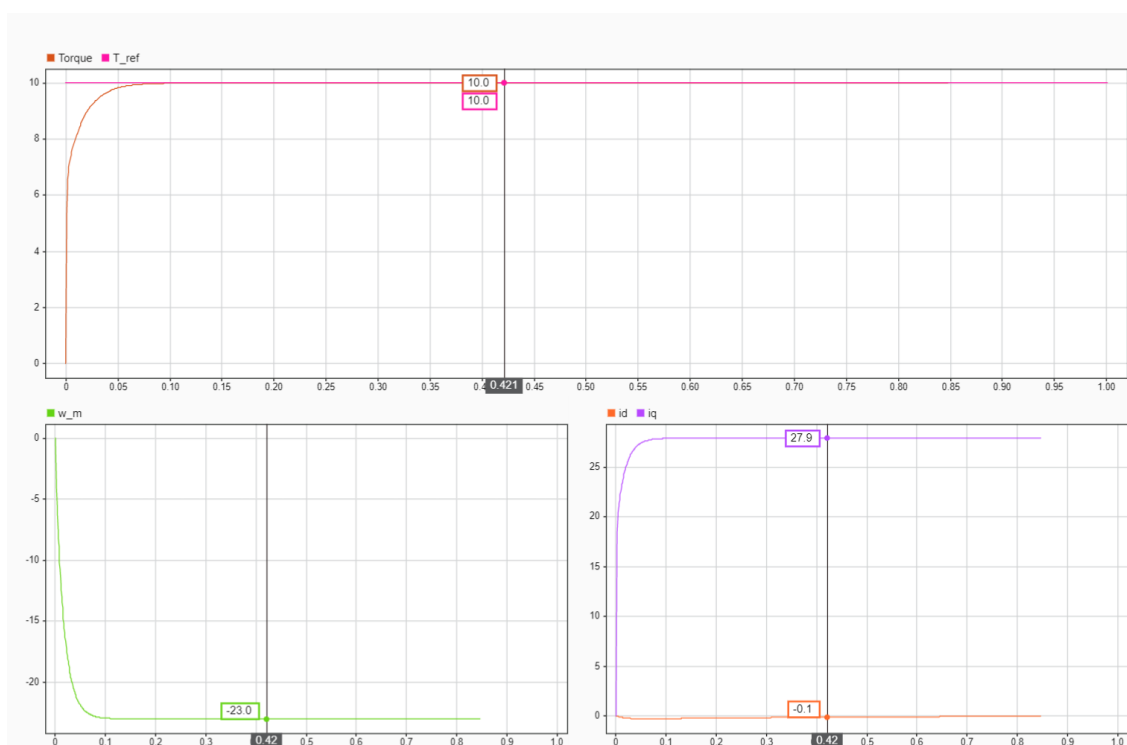


รูปที่ 19.2 : การแปลง v_q เป็น i_q

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} P \omega_m i_d - \frac{\lambda P \omega_m}{L_q}$$

Pole	2
Rs	0.2Ω
Lamda	0.1194 Wb
Ls = Ld = Lq	0.3752 mH
J_motor	0.0027 kg.m^2
T_load	10 N.m

ตารางค่า Parameters ที่ใช้ใน Simulation

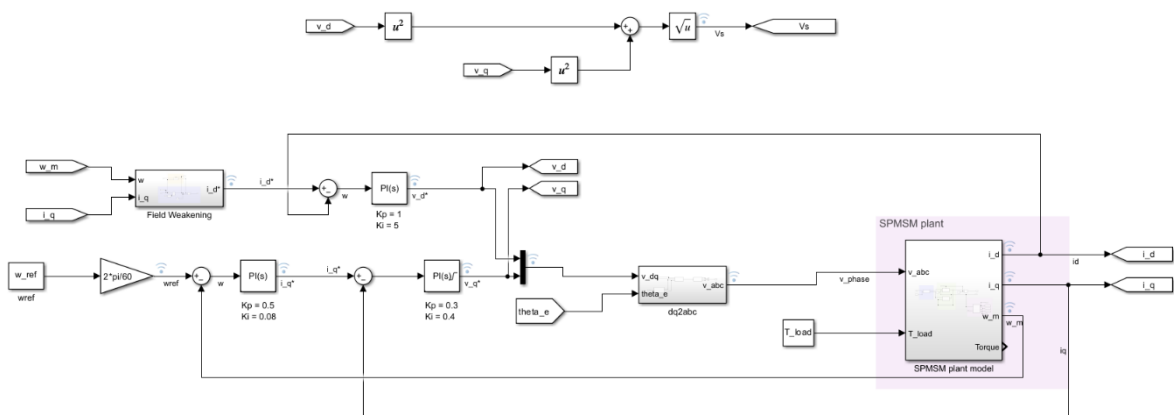


รูปที่ 23 : ผลตอบสนองจากการ simulation torque control SPMSM

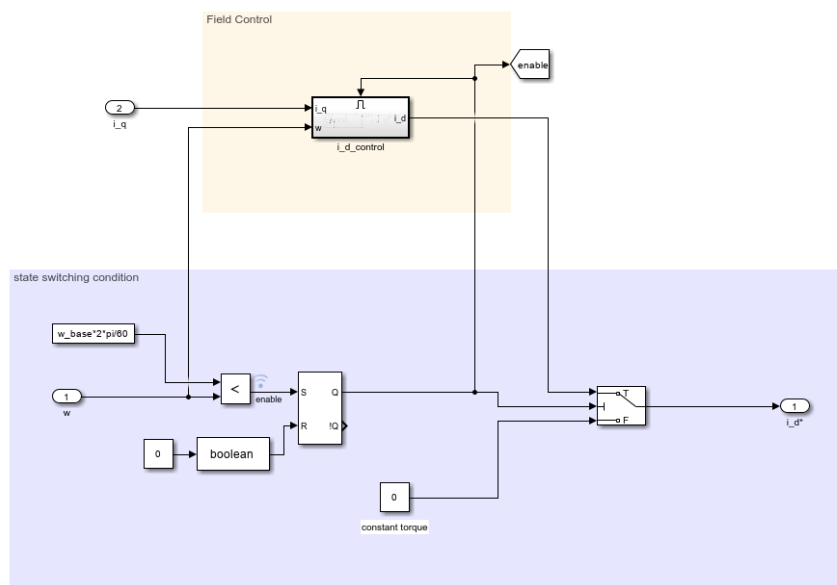
เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางดังกล่าว และกำหนดให้ $T_{load} = 10 \text{ N.m}$ ดังนั้นมอเตอร์จะเข้าสู่ steady state เมื่อ $T_{ref} = 10 \text{ N.m}$ เช่นกัน ซึ่งจะได้ response ดังรูปที่ 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงบิดของมอเตอร์ถูกขับขึ้นไปยังค่าที่ต้องการได้ โดยที่ i_d และ i_q สอดคล้องกับค่าที่ต้องการทางทฤษฎี และความเร็วมอเตอร์คงที่เมื่อเข้าสู่ steady state

3.3.4 Speed control model of SPMSM

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จำเป็นต้องควบคุม 2 ส่วน คือ 1. ควบคุมความเร็วเชิงมุมโดยใช้ i_q ควบคุม v_q และ 2. ควบคุมสถานะการทำงานมอเตอร์ด้วย i_d โดยมอเตอร์จะอยู่ในสถานะ *Torque Constant* เมื่อ $\omega < \omega_{base}$ และ $i_d = 0$ และจะเข้าสู่ *Field Weakening* เมื่อ $\omega > \omega_{base}$ และ $i_d < 0$ ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ และ *controller-plant model* ดังนี้



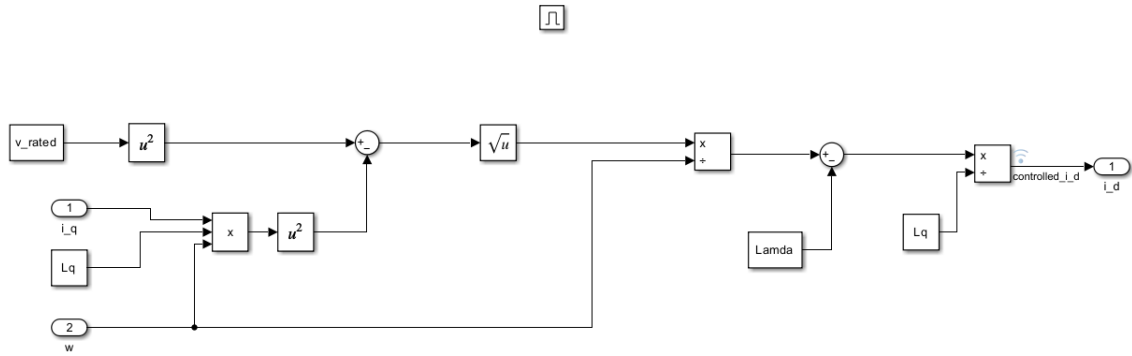
รูปที่ 24 : Speed Controller-Plant model of SPMSM



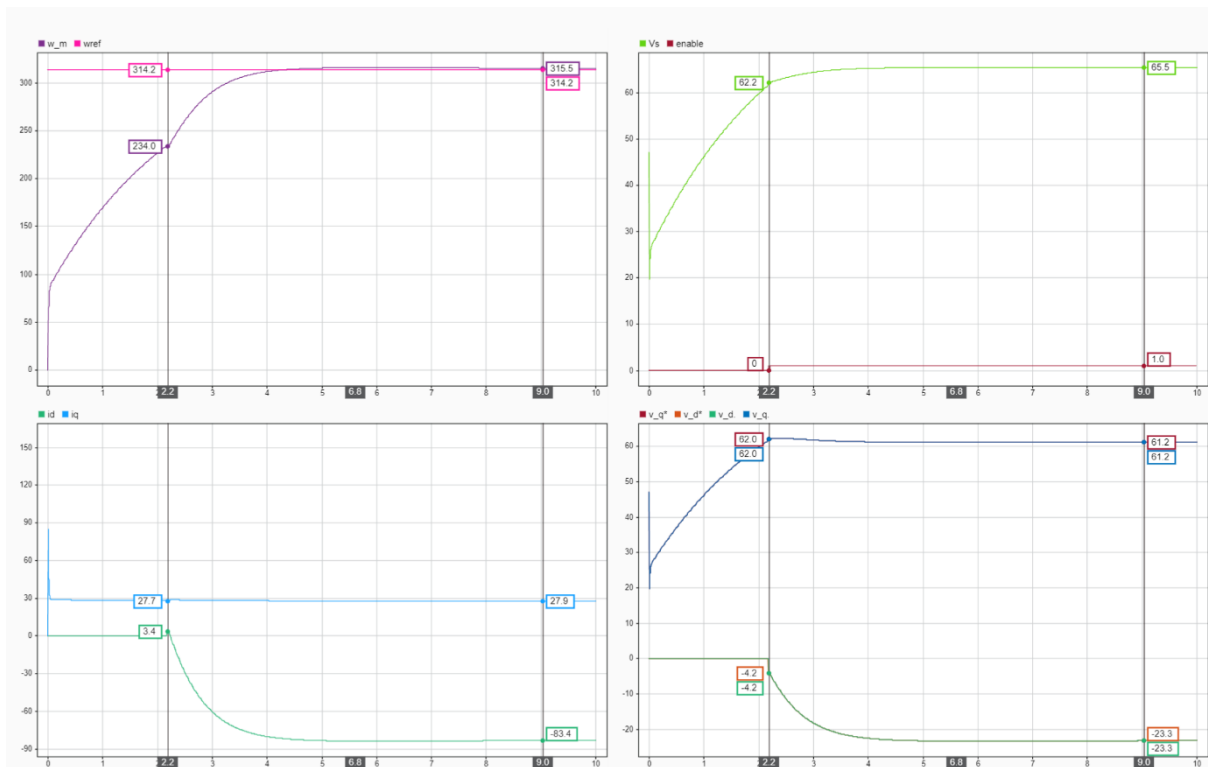
รูปที่ 25 : Field Weakening subsystem

$$i_d = \frac{\sqrt{v_{rated}^2 - \omega^2 L_q^2 i_q^2}}{\omega L_d} - \lambda$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง i_d, i_q, ω ใน *field weakening state*



รูปที่ 26 : i_d control subsystem



รูปที่ 27 : ผลตอบสนองจากการ simulation speed control SPMSM

เมื่อกำหนดให้ $\omega_{base} = 2400 \text{ rpm} = 251.3274 \text{ rad/s}$ โดยใช้ $T_{load} = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$ ถ้าต้องการความเร็วของมอเตอร์ที่ $\omega_{ref} = 3000 \text{ rpm} = 314.1593 \text{ rad/s}$ ซึ่งเป็นค่าที่ $\omega_{ref} > \omega_{base}$ ผลตอบสนองจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1. Constant Torque คือตอนที่ $\omega_{ref} < \omega_{base}$ จะขับมอเตอร์ด้วยแรงบิดคงที่โดย $i_d = 0$ 2. Field Weakening คือช่วงที่ต้องลด $i_d < 0$ เพื่อให้สามารถดันความเร็วไปได้มากกว่า ω_{base} โดยที่ v_{rated} ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง และ 3. Steady state คือช่วงที่ความเร็วถึงค่าที่ต้องการ และ $T = T_{load}$ ซึ่งจะทำให้ความเร็วมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 27

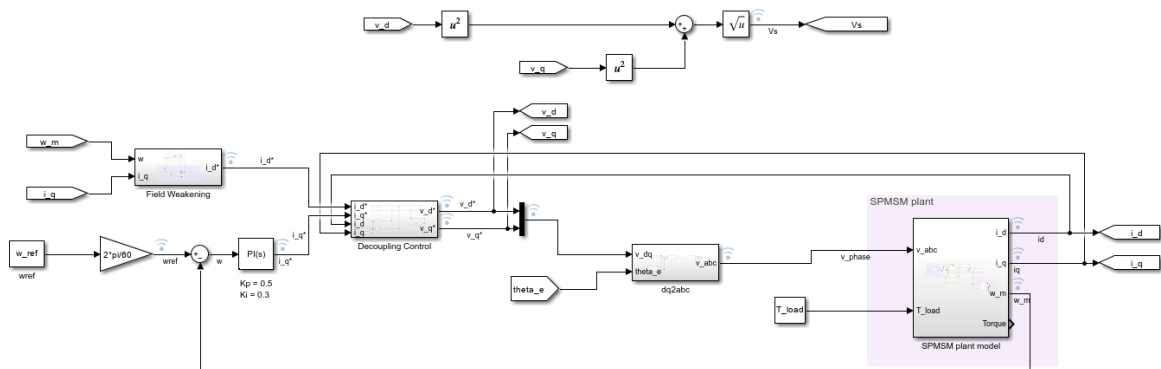
3.3.5 Speed control model of SPMSM with Decoupling control

จากการทำ Speed Control SPMSM ในหัวข้อ 3.3.4 ขั้นตอนการควบคุมมีการใช้ PID controller ทั้งหมด 3 ตัว โดย 2 ตัวในโมเดลถูกใช้ในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่าง v_d, v_q กับ i_d, i_q อย่างไรก็ตาม มีอีกเทคนิคในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองโดยไม่จำเป็นต้องพึ่ง controller ซึ่งเรียกว่า Decoupling control [10] ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการ tune controller และยังประหยัดทรัพยากรในการใช้งานจริง

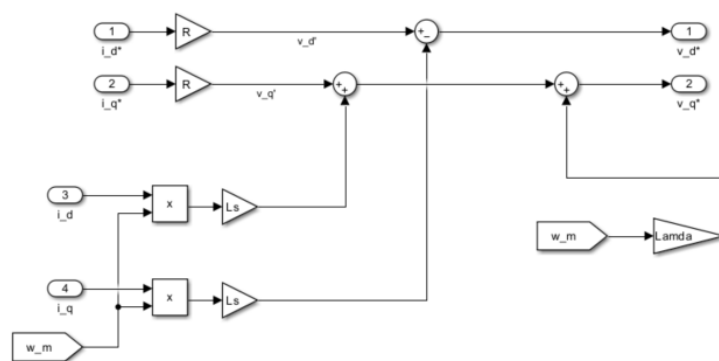
$$v_d = Ri_d - \omega L_q i_q$$

$$v_q = Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \lambda$$

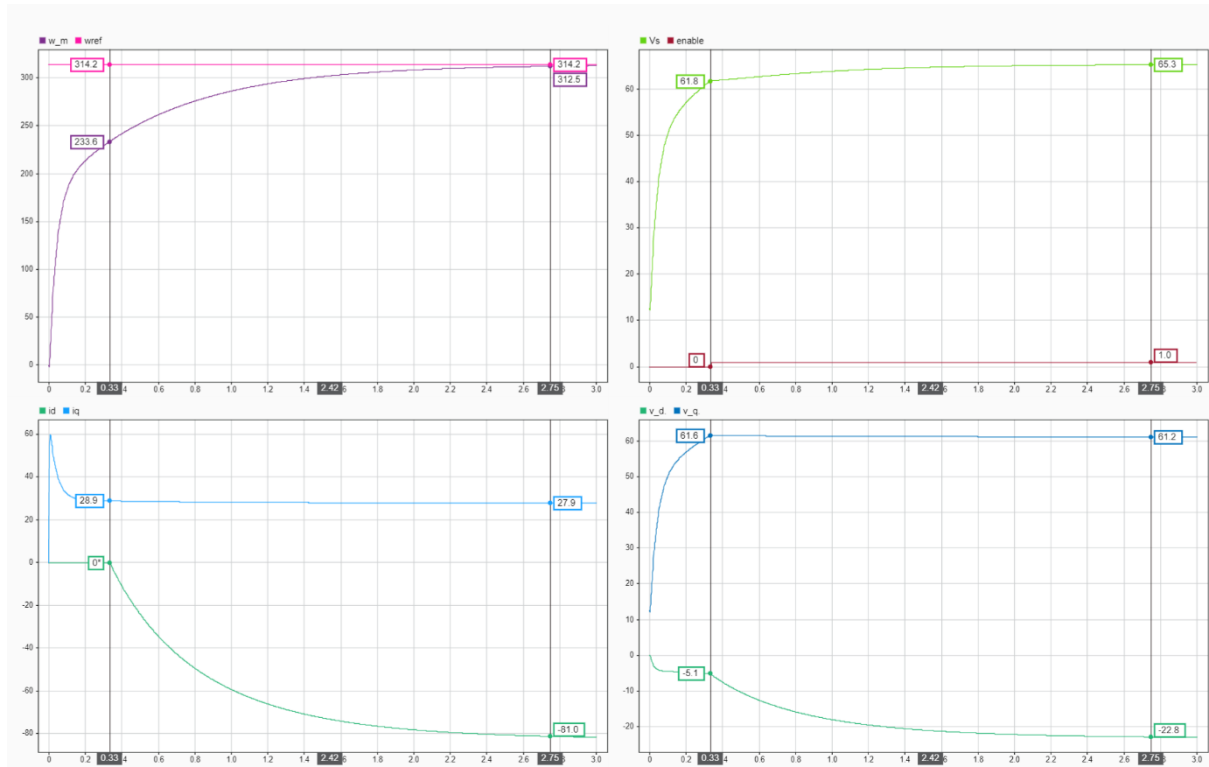
โดยเมื่อพิจารณาสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าการส่งผลข้ามกัน v_d มีผลมาจาก i_q และ v_q มีผลมาจาก i_d การทำ Decoupling จึงเป็นการเลือก control สัญญาณโดยไม่คำนึงถึงพจน์ที่ได้รับผลมาจากอีกแกนหนึ่ง กล่าวคือ $v_d' = Ri_d$ และ $v_q' = Ri_q$ จากนั้นค่อยนำ Parameter อื่นๆเข้ามารวมหลังผ่าน controller เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 28 : speed control model with decoupling control



รูปที่ 29 : decoupling control subsystem



รูปที่ 30 : Decoupling speed control response

เมื่อทำการ simulation โดยอาศัย decoupling control technique จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองตรงตามที่ต้องการทางทฤษฎีและคล้ายกับรูปที่ 29 ซึ่งเป็นการควบคุมด้วย PI controller 3 ตัว แต่จะประหยัดทรัพยากรมากกว่ามาก เทคนิคนี้จึงเหมาะสมกว่าในการใช้งานจริง

บทที่ 4 สรุป

4.1 ประโยชน์ที่ได้รับจากการฝึกงาน

- 4.1.1 ได้เรียนรู้การทำงานของวิศวกรทีมต่างๆในอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า
- 4.1.2 ได้ฝึกใช้งานโปรแกรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น MATLAB, SIMULINK, GITLAB ในการทำงาน
- 4.1.3 ได้ฝึกทักษะการบริหารจัดการเวลา การเรียนรู้ด้วยตนเอง และการสื่อสารให้ผู้อื่นรับฟัง
- 4.1.4 ได้นำความรู้ทางทฤษฎีที่ได้เรียนมาประยุกต์ใช้กับงานจริง ซึ่งทำให้เข้าใจประโยชน์ของความรู้ในหัวข้อนั้นๆมากยิ่งขึ้น

4.2 ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ

ปัญหาและอุปสรรคส่วนมากเกิดจากการใช้งานโปรแกรมในช่วงแรกๆแล้วมีความไม่คุ้นชิน ทำให้มีความยากลำบากอื่นๆตามมา เช่น ตอนนิสิตฝึกใช้งาน GITLAB ในการทำงาน นิสิตได้เริ่มจากการ clone repository ลงมาบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำงาน และเมื่อทำงานเสร็จก็ต้อง commit งานขึ้นไปบน GIT เพื่อเก็บงาน แต่ในการ commit ครั้งแรก นิสิตทำขั้นตอนการ clone repository ซ้ำอีกรอบ ทำให้เกิดการดึงข้อมูลเก่าบน GIT มาเขียนทับ folder ที่ทำงานใหม่เสร็จแล้วบนคอมพิวเตอร์ ทำให้ไฟล์งานหายไป จึงต้องใช้เวลาในการกู้คืนข้อมูลอยู่พักหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia. (July 18, 2024). Proportional–integral–derivative controller. From https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%E2%80%93integral%E2%80%93derivative_controller
- [2] Manuel Gräber. (March 16, 2021). PID Tuning Guide. From <https://tlk-energy.de/blog-en/practical-pid-tuning-guide>
- [3] Steven McFadyen. (March 28, 2012). DC Motor Operation. From <https://myelectrical.com/notes/entryid/153/dc-motor-operation>
- [4] Luca Zaccarian. DCmotors: dynamicmodelandcontroltechniques. From <https://homepages.laas.fr/lzaccari/seminars/DCmotors.pdf>
- [5] Solomotorcontroller. FIELD WAKENING: HOW TO SURPASS THE LIMITS OF YOUR MOTOR. From <https://www.solomotorcontrollers.com/blog/field-weakening/>
- [6] MathWorks. Surface Mount PMSM. <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/surfacemountpmsm.html>
- [7] MathWorks. Clarke Transform. <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/clarketransform.html>
- [8] MathWorks. Park Transform. <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/parktransform.html>
- [9] MathWorks. Park Transform. <https://www.mathworks.com/discovery/field-weakening-control.html>
- [10] Hanlin Shen, Xin Luo, Guilin Liang, and Anwen Shen. (November 2018). A Robust Dynamic Decoupling Control Scheme for PMSM Current Loops Based on Improved Sliding Mode Observer. https://jpels.org/digital-library/manuscript/file/16031/10_JPE-18-02-009.pdf

ภาคผนวก

ภาคผนวก ให้ใส่

- รายงานทุก 2 สัปดาห์ ทุกฉบับ (ต้องมี)
- ตารางลงเวลาทำงานของหน่วยงาน (ถ้ามี)
- ใบลาป่วย/ลากิจ (ถ้ามี)
- แบบฟอร์มขอเปลี่ยนแปลงวันสิ้นสุดการฝึกงาน (ถ้ามี)
- รายละเอียดอื่นๆ เกี่ยวกับงานที่ทำ (ถ้ามี) เช่น datasheet, source code, manual, Powerpoint