

การหาแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวรเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส

Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Fed by Three Phase Rectifier

กิตติวงศ์ สุธรรมโน¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Kittiwong Suthamno¹ Theppanom Sopaprim² Kongpan Areerak^{1*}

¹School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakorn university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: November 26, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ได้แก่ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็วรอบ และวงจรแปรผันแบบบัคก์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่พิจารณาดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส ผ่านวงจรกรองที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วิธีตีความและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะจะนำมาใช้ในการหาลำดับของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแบบจำลองที่ได้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองเสมือนจริงด้วยโปรแกรม MATLAB จะนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองที่ได้จากบทความนี้ โดยผลการตอบสนองที่ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่นำเสนอและแบบจำลองเสมือนจริงมีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร วงจรแปรผันแบบบัคก์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

การก่อรูปแบบจำลอง การจำลองสถานการณ์

ABSTRACT

This paper presents a mathematical model of system with constant power loads. These are speed controlled permanent magnet synchronous motor drive and output voltage controlled buck converter. The considered CPLs are fed by a three phase rectifier via the DC-link filters. The DQ

method and the generalized state-space averaging method (GSSA) are used to derive the dynamic model to achieve the time invariant model. The proposed model is suitable for the stability analysis due to CPL. The simulation via the exact topological model of MATLAB is used to validate the proposed model. The results show that a good agreement between the derived model and the exact topological model can be achieved.

Keyword: PMSM drives, buck converter, constant power load, modeling, simulation.

รายการสัญลักษณ์

V_{ind}, V_{inq}	แรงดันไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดีคิว
V_{busd}, V_{busq}	แรงดันไฟฟ้าบัสอินพุตไดโอดบนแกนดีคิว
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
R_f, L_f	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
R_{cf}, C_f	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
V_{dc}, I_{CPL}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
I_{dc}	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_s, R_c	ค่าความต้านทานขดลวดและแกนเหล็ก
L_{ls}, L_{md}, L_{mq}	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วและร่วมบนแกนดีคิว
B, J	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์
V_{sd}, V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทางสเตเตอร์บนแกนดีคิว
I_{sd}, I_{sq}	กระแสไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์บนแกนดีคิว
I_{od}, I_{oq}	กระแสไฟฟ้าสร้างแรงบิดบนแกนดีคิว
λ_{PM}	เส้นแรงแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์
ω_r, τ_{load}	ความเร็วรอบที่เพลาและแรงบิดที่เพลา
m_d, m_q	ค่าดัชนีการมอดูเลตบนแกนดีคิว
K_{pi}, K_{ii}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูประแส
K_{pw}, K_{iw}	ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอลูประแสเร็ว
X_{sd}, X_{sd}	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของลูประแส
X_w	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของลูประแสเร็ว
I_{CPL_P}	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์
I_{CPL_B}	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายวงจรแปรผันแบบบัคค์
I_{lb}, V_o	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัคค์
R_{Lb}, L_b, C_b	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัคค์
R_{load}	ค่าความต้านทานของโหลด
X_i, X_v	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงลูประแสและแรงดัน

K_{pib}, K_{iib}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูประแส
K_{pv}, K_{iv}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูประแสเร็ว
d	ค่าดัชนีการสวิตช์ของวงจรแปรผันแบบบัคค์

1. บทนำ

ณ ปัจจุบันได้มีการนำวงจรแปลงผันกำลังมาใช้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้ากันอย่างกว้างขวาง ทั้งแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสตรงปรับค่าได้ กระแสตรงเป็นกระแสสลับ และกระแสสลับเป็นกระแสตรง ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ ได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า วงจรควบคุมความสว่างและวงจรควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น วงจรแปรผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads ย่อ CPLs) [1] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนมีลักษณะทิศทางผกผัน คือแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลลดลง ในทางตรงข้ามแรงดันไฟฟ้าลดลง ผลกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า ที่มีอัตราความชันเหมือนค่าความต้านทานเป็นลบ ณ จุดทำงานนั้น ๆ จากงานวิจัยในอดีต [2],[3] พบว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ ของการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นเมื่อมีโหลดดังกล่าวต่อในระบบเพิ่มขึ้น อาจจะทำให้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขาดเสถียรภาพได้ หรือเรียกปรากฏการดังกล่าวว่า การขาดเสถียรภาพเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์เป็นลบ (Negative impedance instability)

สำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ เป็นระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล ต่อผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อจ่ายไปยังบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และเชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าแบบคงตัว ซึ่งอาจทำให้ระบบดังกล่าวเกิดการขาดเสถียรภาพได้ เมื่อระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในการป้องกันการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการวิเคราะห์หาจุดขาดเสถียรภาพ โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปรผันกำลัง จะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เมื่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงมีงานวิจัย [2],[3] ที่มีการนำเสนอวิธีการหาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model) กับวงจรแปลงผันกำลัง ได้แก่วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (Generalized state-space averaging method :GSSA) [4] นิยมนำมาพิสูจน์แบบจำลองของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี และในส่วนวิธีดีคิว (DQ method) [5] นิยมนำมาวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ซึ่งได้มีการนำเสนอในงานวิจัย [6]-[7] แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร เพื่อใช้ในการควบคุม แต่ยังไม่ปรากฏค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นในการพิจารณากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า จึงพิจารณาการสูญเสียทั้งในขดลวดและแกนเหล็ก จึงเลือกแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า

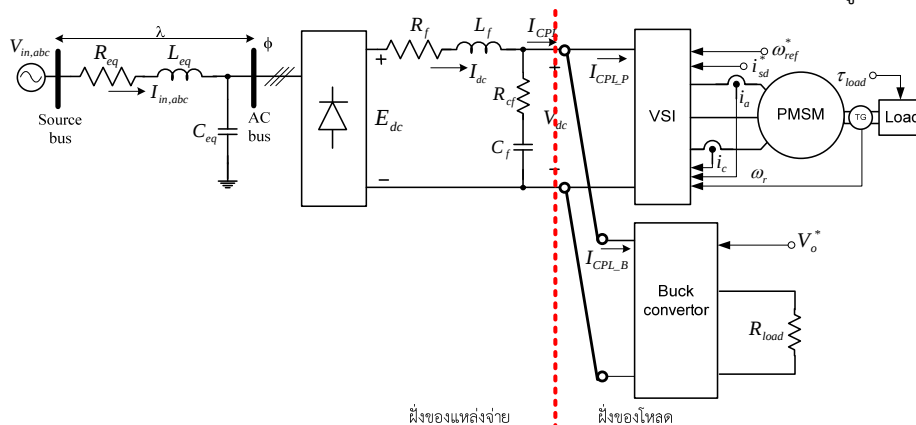
ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่ปรากฏค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ที่มีการนำเสนอไว้ใน [8] เพื่อการออกแบบการควบคุมให้เกิดสถานะค่าการสูญเสียต่ำสุด

ในบทความนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นสี่ส่วน คือ ในส่วนแรกเป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา ถึงความสำคัญในการหาแบบจำลอง ส่วนที่สองเป็นการหาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา มีการแยกออกเป็นสองส่วน คือแบบจำลองทางฝั่งแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส และแบบจำลองทางฝั่งโหลด ที่เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสองโหลด ได้แก่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร กับวงจรแปลงผันแบบบักค์ ส่วนที่สามเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผล

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาในบทความนี้แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ บนบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ และมีการต่อขนานโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสองชุดร่วมกัน ได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่มีการควบคุมความเร็วรอบ และวงจรแปรผันแบบบักค์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

โหลดดังกล่าวจะทำให้ระบบมีโอกาสดูขาดเสถียรภาพได้ เมื่อระดับกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงดัน

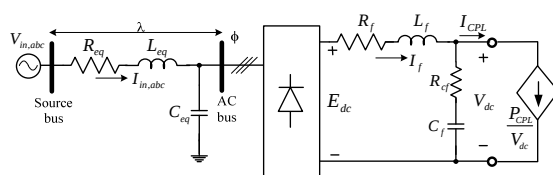


รูปที่ 1 ระบบที่พิจารณา

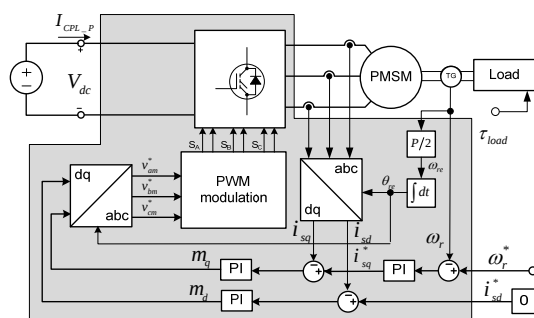
ที่บัสไฟตรง(V_{dc})มีการกระเพื่อม จนกระทั่งไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมทั้งไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุต ของวงจรแปลงผันแบบบักเก็ตได้ ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมทั้งการยืนยันความถูกต้อง โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ จะแยกออกเป็น 2 ฝั่ง คือฝั่งของแหล่งจ่าย และฝั่งของโหลด โดยฝั่งของแหล่งจ่ายแสดงดังรูปที่ 2 ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในฝั่งของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ในการตรวจสอบความถูกต้อง จำเป็นต้องจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว(P_{CPL}) ที่กระแสไฟฟ้าที่บัส(I_{CPL}) สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าคงตัวหารด้วยขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส(P_{CPL}/V_{dc}) โดยมีการนำเสนอในส่วนข้อที่ 3.1



รูปที่ 2 วงจรในฝั่งของแหล่งจ่าย

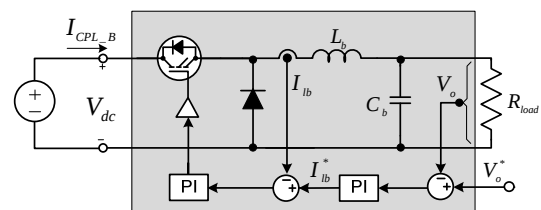


รูปที่ 3 วงจรในฝั่งของโหลดที่เป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในฝั่งของโหลด แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่มีการควบคุมความเร็วรอบ (ω_r^*) และมีการขับโหลดที่เพลา (τ_{load}) พร้อมทั้งควบคุม

กระแสไฟฟ้าบนแกนดี(I_{sd}^*) แสดงดังรูปที่ 3 โดยต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2

สำหรับวงจรแปรผันแบบบักเก็ต ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต(V_o^*) ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน (R_{load}) ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง จึงต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับวงจรแปรผันแบบบักเก็ต แสดงดังรูปที่ 4 โดยจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 4 วงจรในฝั่งของโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักเก็ต

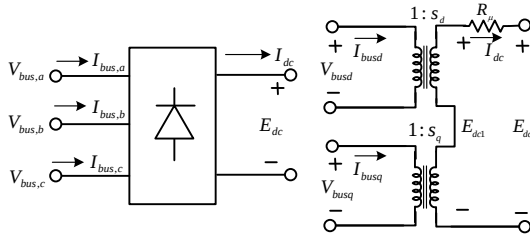
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส

จากรูปที่ 2 ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส ผ่านไดโอดบริดจ์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีวงจรกรองที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ(L_f) พร้อมพิจารณาความต้านทานภายใน (R_f) แล้วต่อขนานกับตัวเก็บประจุ(C_f) ที่พิจารณาค่าความต้านทานภายใน(R_f) เช่นกัน และมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง(R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) จะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้า(Source bus) กับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ(AC bus) เท่ากับ (λ) จะใช้วิธีการตีคว ส่งผลการพิจารณาแสดงได้ดังวงจรสมมูลบนแกนดีคิว [2],[5] แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลของการนำกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีผลของตัวเหนี่ยวนำในสายส่งกำลังไฟฟ้า (L_{eq}) ทำให้เกิดมุมเหลื่อม(Overlap angle) ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตก ผลกระทบนี้สามารถพิจารณาแทนด้วยความต้านทาน ต่ออนุกรมในวงจรเรียงกระแส ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำในสายส่ง($R_\mu = 3\omega L_{eq}/\pi$) ส่วนการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้

อยู่บนแกนตีควจะอาศัยวิธีการใน [2] แสดงดังสมการที่ (1) โดยมีความสัมพันธ์กับมุมหมุนของแกนตีคว (θ) กับมุมอ้างอิงที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ϕ_1)

$$S_{dq} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 - \theta) \\ \sin(\phi_1 - \theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

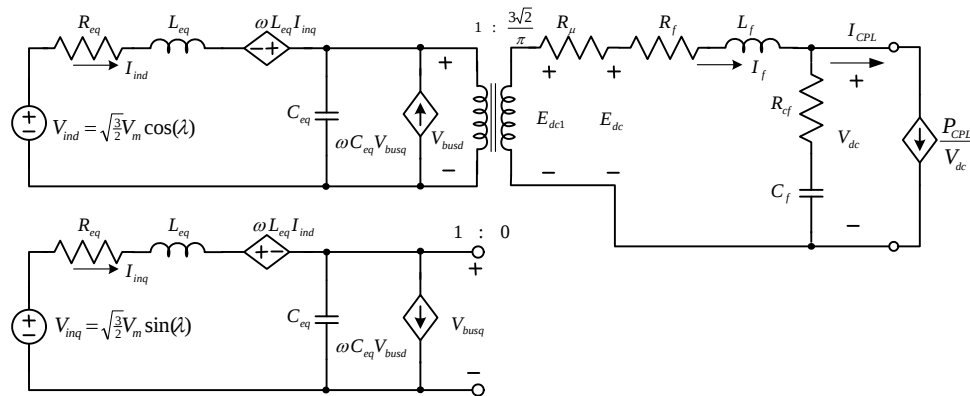
ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า ที่กำหนดให้มุมหมุนอ้างอิงแกนตีควเท่ากับ มุมที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ($\theta = \phi_1$) ดังนั้นฟังก์ชัน การสวิตช์บนแกนตีคว $s_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$ และ $s_q = 0$ สามารถ เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 5 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส

$$\begin{cases} E_{dc1} = s_d V_{busd} + s_q V_{busq} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{busd} \\ I_{busd} = s_d I_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{dc} \\ I_{busq} = s_q I_{dc} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้าในสมการที่(2) สามารถเขียนวงจรสมมูลของ

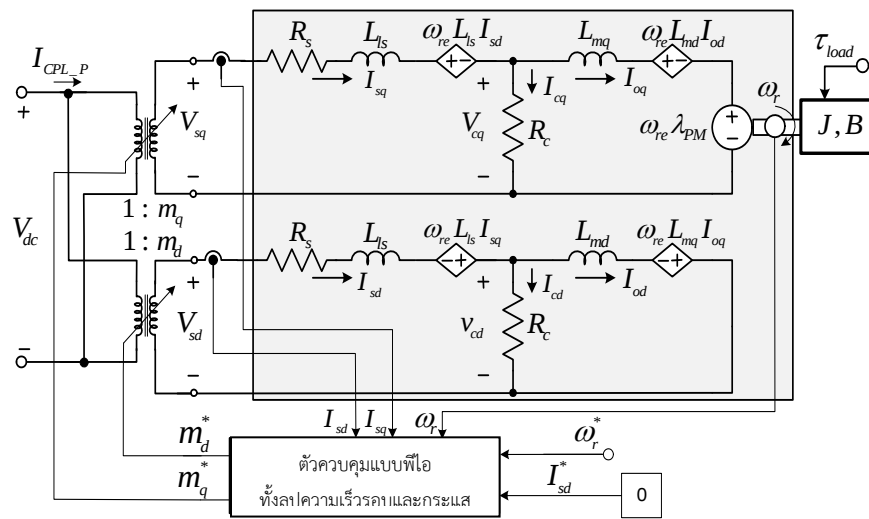


รูปที่ 6 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

วงจรเรียงกระแสในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6 โดยผลของมุมที่บัสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมมูลมีมุม นำหน้าด้วย λ สามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอินพุตบน แกนตีควมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้า สาม สม ดุล กับ มุม λ ($V_{ind} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda)$ กับ $V_{inq} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda)$) ดังนั้นนำกฎ KVL และ KCL วิเคราะห์วงจรในรูปที่ 6 จะได้สมการอนุพันธ์ของระบบที่ พิจารณา แสดงดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} \dot{I}_{ind} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ind} + \omega I_{inq} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} V_{busd} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} V_m \\ \dot{I}_{inq} = -\omega I_{ind} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{inq} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} V_{busq} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} V_m \\ \dot{V}_{busd} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ind} + \omega V_{busq} - \frac{1}{C_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \\ \dot{V}_{busq} = \frac{1}{C_{eq}} I_{inq} - \omega V_{busd} \\ \dot{I}_{dc} = \frac{1}{L_f} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_{busd} - \frac{R_\mu + R_f + R_{cf}}{L_f} I_{dc} - \frac{1}{L_f} V_{dc} \\ \quad + \frac{R_{cf}}{L_f} I_{CPL} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_f} I_{dc} - \frac{1}{C_f} I_{CPL} \end{cases} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่ามีส่วนแปรสถานะอินพุต สองตัวคือ $\mathbf{U} = [V_m \ I_{CPL}]^T$ ตัวแปรสถานะของระบบหกตัว คือ $\mathbf{X} = [I_{ind} \ I_{inq} \ V_{busd} \ V_{busq} \ I_{dc} \ V_{dc}]^T$ ซึ่งในการตรวจสอบ ความถูกต้องของแบบจำลอง จะกำหนดตัวแปรเอาต์พุต สองตัวคือ $\mathbf{Y} = [I_{dc} \ V_{dc}]^T$ โดยมีการเปลี่ยนโหลดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 7 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่มีการควบคุมความเร็วรอบ

คงตัว (P_{CPL}) ให้กับกระแสไฟฟ้าที่บัส ($I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_{dc}}$) และการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (V_m) เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) มีความสัมพันธ์ กับผลรวมของกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้งสองร่วมกัน ในส่วนการหาฟังก์ชันอิมพีแดนซ์ฝั่งของแหล่งจ่ายจากความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรสถานะเอาต์พุต $\mathbf{Y}=[V_{dc}]$ กับตัวแปรสถานะอินพุต $\mathbf{U}=[I_{CPL}]$ จะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเท่ากับศูนย์ ($V_m=0$)

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร

จากระบบที่พิจารณาในส่วนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวร ที่มีการควบคุมความเร็วรอบ สามารถพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวรได้จาก [8] แสดงดังรูปที่ 7 ต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์ (Space vector PWM) ซึ่งสามารถเปลี่ยนวงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอุดมคติบนแกนตีคว ได้เช่นเดียวกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ [3]

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าบนแกนตีคว ($V_{sd} V_{sq}$) มีความสัมพันธ์เท่ากับสองส่วนสามของแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรง ($\frac{2}{3} V_{dc}$) และดัชนีการมอดูเลตแกนตีคว ($m_d m_q$) ($V_{sq} = \frac{2}{3} m_q V_{dc}$ และ $V_{sd} = \frac{2}{3} m_d V_{dc}$) ดังนั้นพิจารณา กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ในส่วนของ

หม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติบนแกนตีควสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$I_{CPL_P} V_{dc} = \frac{3}{2} (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \quad (4)$$

ดังนั้นในการพิจารณากระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL_P}) ทำได้โดยการแทนแรงดันไฟฟ้าบนแกนตีควลงในสมการที่ (4) จะได้สมการในรูปของกระแสไฟฟ้าใหม่ดังสมการที่ (5)

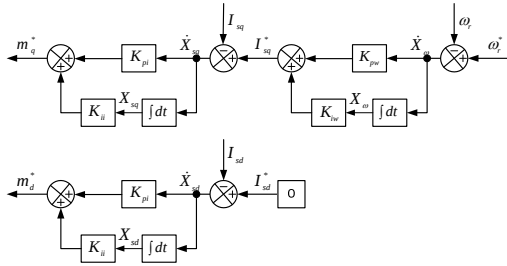
$$I_{CPL_P} = m_d I_{sd} + m_q I_{sq} \quad (5)$$

ดำเนินการพิจารณาวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบวงเปิดที่มีการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยกฎ KVL และ KCL จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวรโดยมีค่าพารามิเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ได้แก่ ค่าความต้านทานขดลวดและแกนเหล็ก ($R_s R_r$) ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กถาวรและรวมแกนตีคว ($L_s L_{md} L_{mq}$) และค่าสนามแม่เหล็กถาวร (λ_{PM}) สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบวงเปิดได้ ดังสมการที่ (6)

ดำเนินการพิจารณาค่าดัชนีของการมอดูเลตบนแกนตีคว จากวงจรควบคุมแบบพีโอของลูปความเร็วและลูปกระแสแสดงดังรูปที่ 8 และสามารถเขียนสมการ

ความสัมพันธ์ของการควบคุมแบบพีไอ ที่มีกระแสอ้างอิงแกนคิว ค่าดัชนีการมอดูเลตบนแกนดีคิวได้ดังสมการที่ (7)

$$\begin{cases} I_{sq} = \frac{2}{3L_{ls}} m_q V_{dc} - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sq} + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{oq} - \frac{P}{2} \omega_r I_{sd} \\ \dot{I}_{sd} = \frac{2}{3L_{ls}} m_d V_{dc} - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sd} + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{od} + \frac{P}{2} \omega_r I_{sq} \\ \dot{I}_{oq} = \frac{R_c}{L_{mq}} I_{sq} - \frac{R_c}{L_{mq}} I_{oq} - \frac{P}{2} \frac{L_{md}}{L_{mq}} \omega_r I_{od} - \frac{1}{L_{mq}} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{PM} \\ \dot{I}_{od} = \frac{R_c}{L_{md}} I_{sd} - \frac{R_c}{L_{md}} I_{od} + \frac{P}{2} \frac{L_{mq}}{L_{md}} \omega_r I_{oq} \\ \dot{\omega}_r = \frac{3P}{4J} (\lambda_{PM} I_{oq} + (L_{md} - L_{mq}) I_{oq} I_{od}) - \frac{B}{J} \omega_r \\ - \frac{1}{J} \tau_{load} \end{cases} \quad (6)$$



รูปที่ 8 วงจรควบคุมแบบพีไอของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

$$\begin{cases} m_q^* = K_{pi} K_{pw} \omega_r^* - K_{pi} K_{pw} \omega_r + K_{pi} K_{iw} X_w \\ - K_{pi} I_{sq} + K_{ii} X_{sq} \\ m_d^* = K_{pi} (I_{sd}^* - I_{sd}) + K_{ii} X_{sd} \end{cases} \quad (7)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (I_{CPL_P}) หาได้จากการแทนค่าในสมการที่ (7) ในสมการที่ (5) จะได้ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} I_{CPL_P} &= K_{pi} I_{sd}^* I_{sd} - K_{pi} I_{sd}^2 + K_{ii} X_{sd} I_{sd} + K_{pi} K_{pw} \omega_r^* I_{sq} \\ &\quad - K_{pi} K_{pw} \omega_r I_{sq} + K_{pi} K_{iw} X_w I_{sq} - K_{pi} I_{sq}^2 \\ &\quad + K_{ii} X_{sq} I_{sq} \end{aligned} \quad (8)$$

จากสมการที่ (6) ดำเนินการพิจารณาสมการอนุพันธ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวรแบบวงปิด ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยการแทนค่าดัชนีการมอดูเลตบนแกนดีคิว ($m_q = m_q^*$ และ $m_d = m_d^*$) จากสมการที่(7) สามารถเขียนสมการอนุพันธ์แบบวงปิดแสดงดังสมการที่ (9)

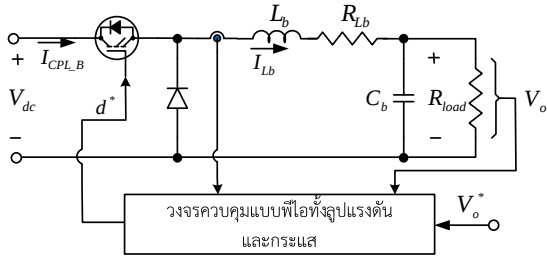
$$\begin{cases} \dot{I}_{sq} = -\frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} K_{pw} \omega_r V_{dc} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} K_{iw} X_w V_{dc} \\ - \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} I_{sq} V_{dc} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{ii} X_{sq} V_{dc} - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sq} \\ + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{oq} - \frac{P}{2} \omega_r I_{sd} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} K_{pw} \omega_r^* V_{dc} \\ \dot{I}_{sd} = \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} I_{sd}^* V_{dc} - \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} I_{sd} V_{dc} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{ii} X_{sd} V_{dc} \\ - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sd} + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{od} + \frac{P}{2} \omega_r I_{sq} \\ \dot{I}_{oq} = \frac{R_c}{L_{mq}} I_{sq} - \frac{R_c}{L_{mq}} I_{oq} - \frac{P}{2} \frac{L_{md}}{L_{mq}} \omega_r I_{od} - \frac{1}{L_{mq}} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{PM} \\ \dot{I}_{od} = \frac{R_c}{L_{md}} I_{sd} - \frac{R_c}{L_{md}} I_{od} + \frac{P}{2} \frac{L_{mq}}{L_{md}} \omega_r I_{oq} \\ \dot{\omega}_r = \frac{3P}{4J} (\lambda_{PM} I_{oq} + (L_{md} - L_{mq}) I_{oq} I_{od}) - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{1}{J} \tau_{load} \\ \dot{X}_w = \omega_r^* - \omega_r \\ \dot{X}_{sq} = K_{pw} \omega_r^* - K_{pw} \omega_r + K_{iw} X_w - I_{sq} \\ \dot{X}_{sd} = I_{sd}^* - I_{sd} \end{cases} \quad (9)$$

จากแบบจำลองในสมการที่ (8) และ (9) ดำเนินควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) ควบคุมกระแสไฟฟ้าแกนดีอ้างอิงเท่ากับศูนย์ (I_{sd}^*) ควบคุมความเร็วรอบอ้างอิง (ω_r^*) และแรงบิดที่เพลาลูก (τ_{load}) เพื่อหาผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ชั่ว ($I_{sd} I_{sq}$) ความเร็วรอบ (ω_r) และกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (I_{CPL_P}) โดยแบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ต้องทำแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นแบบเชิงเส้น โดยอาศัยวิธีการของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) และตัวแปรสถานะเอาต์พุตเป็นกระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL_P}) ณ จุดทำงาน และกำหนดให้ ความเร็วรอบ แรงบิดและกระแสไฟฟ้าแกนดีเป็นค่าคงที่

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปรผันแบบบัทช์

วงจรแปรผันแบบบัทช์ ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 9 โดยตัวเหนี่ยวนำในวงจรจะมีการพิจารณา

ค่าความต้านทานขดลวด (L_b, R_{Lb}) ที่ต่ออนุกรม และตัวเก็บประจุ (C_b) ต่อขนานกับโหลดความต้านทาน (R_{load}) จากการศึกษาใน [4],[5] มีฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปรผันแบบบัคค์ ($u(t)$) ดังสมการที่ (10) โดยกำหนดให้ d คือ ดัชนีของการสวิตช์และ T_s คือคาบเวลาในการสวิตช์



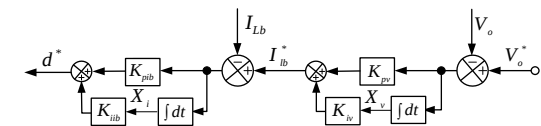
รูปที่ 9 วงจรแปรผันแบบบัคค์ ที่มีการควบคุม

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (10)$$

ดังนั้นการประยุกต์ใช้วิธีการปริภูมิสถานะเฉลี่ยทั่วไปสามารถเปลี่ยนเป็นค่าดัชนีของการสวิตช์ (d) เป็นค่าสัมประสิทธิ์เลขเชิงซ้อนของอนุกรมฟูเรียร์ ($\langle u(t) \rangle_0 = d$) ดังนั้นจากรูปที่ 9 พิจารณาในส่วนของวงจรแปรผันแบบบัคค์ ที่มีการควบคุมแบบวงเปิด พิจารณากฎ KVL และ KCL สามารถเขียนสมการอนุพันธ์วงจรแปรผันแบบบัคค์แบบวงเปิดได้ดังสมการที่ (11)

$$\begin{cases} \dot{I}_{Lb} = \frac{d}{L_b} V_{dc} - \frac{R_{Lb}}{L_b} I_{Lb} - \frac{1}{L_b} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C_b} I_{Lb} - \frac{1}{R_{load} C_b} V_o \end{cases} \quad (11)$$

พิจารณาการควบคุมแบบวงปิด ที่มีวงจรควบคุมแบบฟีดแบ็กแรงดัน (K_{pv}, K_{iv}) และกระแส (K_{pib}, K_{iib}) ดังรูปที่ 10 สามารถหาค่าดัชนีของการสวิตช์ (d^*) ของวงจรควบคุมแบบฟีดแบ็กได้ดังสมการที่ (12)



รูปที่ 10 วงจรควบคุมแบบฟีดแบ็กของวงจรแปรผันแบบบัคค์

$$d^* = -K_{pv} K_{pib} V_o - K_{pib} I_{Lb} + K_{iv} K_{pib} X_v + K_{iib} X_i + K_{pv} K_{pib} V_o^* \quad (12)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผ่านวงจรสวิตช์จะมีความสัมพันธ์กับค่าของดัชนีของการสวิตช์ แสดงดังสมการที่ (13)

$$\begin{cases} V_b = -K_{pv} K_{pib} V_o V_{dc} - K_{pib} I_{Lb} V_{dc} + K_{iv} K_{pib} X_v V_{dc} + K_{iib} X_i V_{dc} + K_{pv} K_{pib} V_o^* V_{dc} \\ I_{CPL_B} = -K_{pv} K_{pib} V_o I_{Lb} - K_{pib} I_{Lb}^2 + K_{iv} K_{pib} X_v I_{Lb} + K_{iib} X_i I_{Lb} + K_{pv} K_{pib} V_o^* I_{Lb} \end{cases} \quad (13)$$

ดังนั้นพิจารณาการควบคุมแบบวงปิดของวงจรแปรผันแบบบัคค์ ที่มีตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กในรูปที่ 9 สามารถแทนค่า $d = d^*$ และเขียนสมการอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (14)

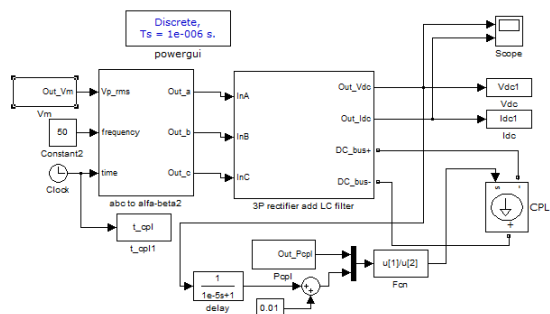
$$\begin{cases} \dot{I}_{Lb} = -\frac{R_{Lb}}{L_b} I_{Lb} - \frac{K_{pib}}{L_b} V_{dc} I_{Lb} - \frac{1}{L_b} V_o - \frac{K_{pv} K_{pib}}{L_b} V_{dc} V_o + \frac{K_{iv} K_{pib}}{L_b} V_{dc} X_v + \frac{K_{iib}}{L_b} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pib}}{L_b} V_{dc} V_o^* \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C_b} I_{Lb} - \frac{1}{R_{load} C_b} V_o \\ \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{X}_i = -K_{pv} V_o - I_{Lb} + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^* \end{cases} \quad (14)$$

จากสมการที่ (13) และ (14) ดำเนินควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัคส์ (V_{dc}) ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิง (V_o^*) เพื่อหาผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) กระแสไฟฟ้าในวงจร (I_{Lb}) และกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (I_{CPL_B}) โดยแบบจำลองเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดนี้ ต้องทำเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นค่าคงที่ ณ จุดทำงาน

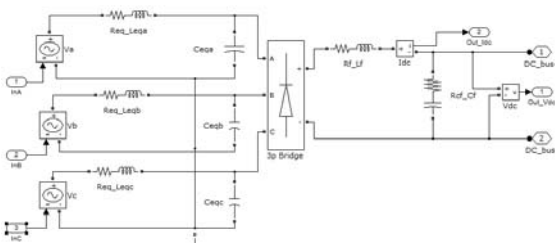
4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.1 การจำลองสถานการณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ดำเนินการกำหนดให้ $I_{CPL} = P_{CPL} / V_{dc}$ เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติของวงจร และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์สายส่ง $L_{eq} = 2.51 \text{ mH}$ $C_{eq} = 906.35 \text{ nF}$ และ $R_{eq} = 1.00 \Omega$ ในส่วนของวงจรกรอง $R_f = 0.40 \Omega$ $L_f = 55.00 \text{ mH}$ $R_{cf} = 0.91 \Omega$ และ $C_f = 195.47 \mu\text{F}$ โดยการต่อวงจรแสดงดังในรูปที่ 11 เป็นการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสที่สามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งรายละเอียดการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 12 ในส่วนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในบล็อกขวาสุดที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้า เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบควบคุม ตามสมการกระแสไฟฟ้าที่กล่าวไว้ข้างต้น



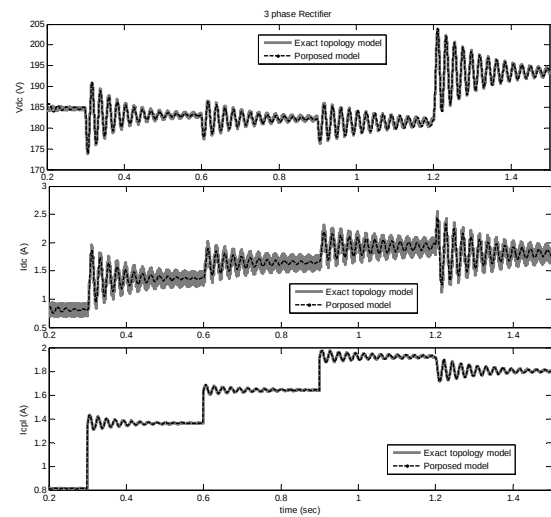
รูปที่ 11 การต่อวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด



รูปที่ 12 รายละเอียดของบล็อก 3P rectifier add LC

ดำเนินการจำลองสถานการณ์กำหนดให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 80 Vrms โดยจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าคงที่ที่ 150 วัตต์ หลังจากนั้นที่เวลา 0.3 0.6 และ 0.9 วินาที ได้เพิ่มโหลดเป็น 250 300 และ 350 วัตต์ตามลำดับ และในลำดับสุดท้ายได้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็น 85 Vrms ที่เวลา 1.2 วินาที โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL}) ดังรูปที่ 13 โดยเส้นสีเทาเป็นของการจำลองผ่านวงจรในรูปที่ 11 ส่วนเส้นสีดำประ

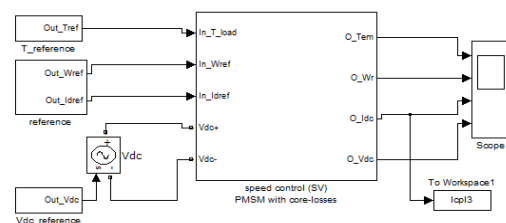
ได้จากแบบจำลองดังสมการที่ (3) จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองมีความสอดคล้องกัน ตลอดย่านการทำงานที่กำหนด อีกทั้งผลของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีผลกระทบต่อกระแสที่โหลด เช่นที่เวลา 1.2 วินาที ทำให้ขนาดกระแสไฟฟ้าที่บัสลดลง เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสเพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแส

4.2 การจำลองสถานการณ์ของวงจรขับเคลื่อน

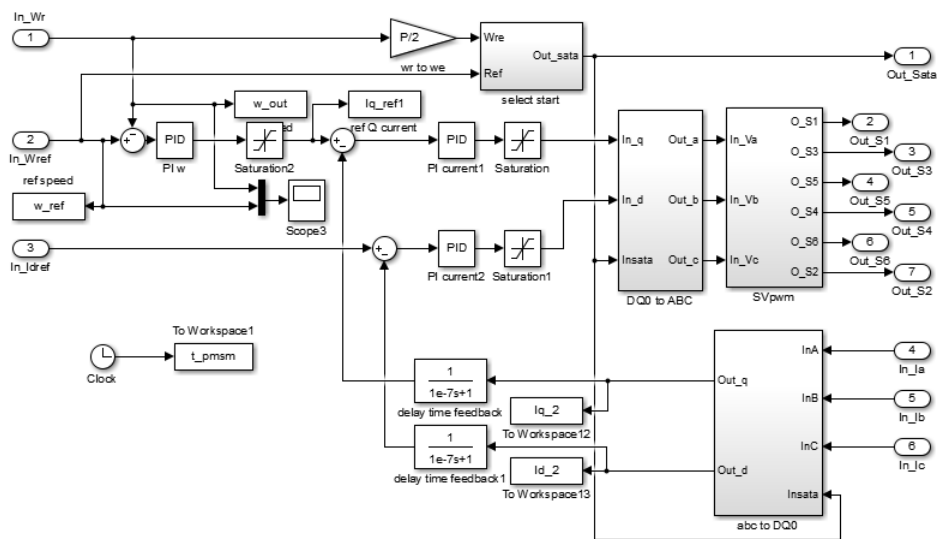
มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 14 การต่อวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

ดำเนินการต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสัญญาณควบคุมสามส่วนคือความเร็วรอบ แรงบิด และกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่แกนดีมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอด แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีการควบคุมเป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส แสดงดังรูปที่ 14 ซึ่งมีส่วนประกอบภายในสองส่วน คือ ส่วนแรกคือบล็อกควบคุมแบบฟีดแบ็กลูปความเร็วรอบและลูปกระแสไฟฟ้า เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสามเฟส ผ่านแปลงสัญญาณสามเฟสเป็นการผสมสัญญาณแบบสเปกเทรเตอร์ ที่ส่งสัญญาณควบคุม

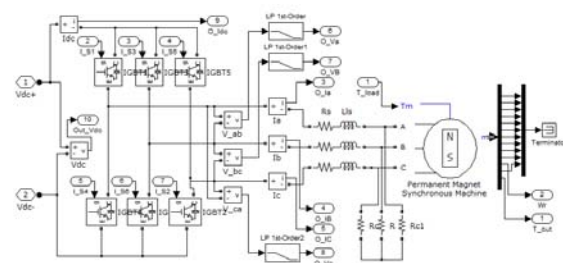
ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 15 การต่อบล็อกควบคุมแบบฟีดแบ็ค

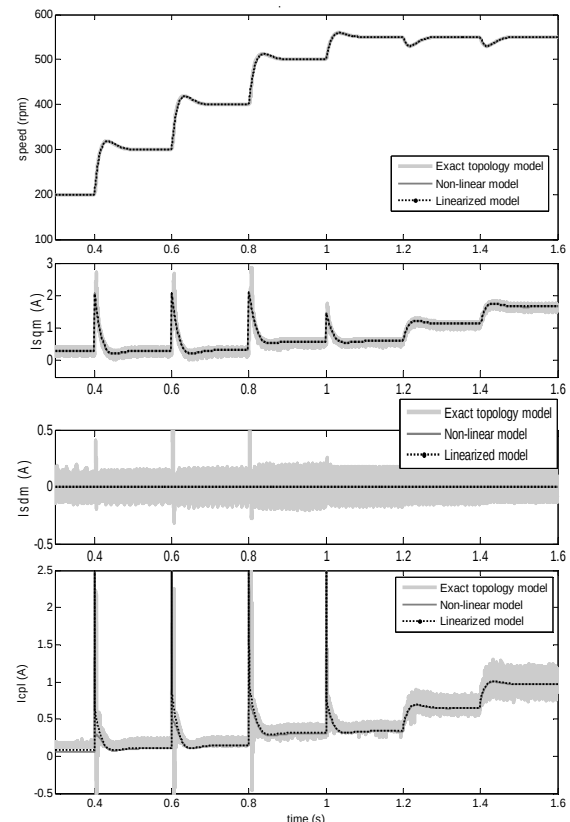
การสวิตช์ทั้งหกตัว แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 15 และส่วนที่สองเป็นบล็อกการต่ออินเวอร์เตอร์ เพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 16

ในรูปที่ 15 มีค่าพารามิเตอร์ของบล็อกควบคุมแบบฟีดแบ็คที่ควบคุมความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้า มีค่าดังนี้ $K_{pw}=0.17$ $K_{iw}=6.67$ $K_{pi}=115.48$ และ $K_{ii}=47,892.05$ ส่วนในรูปที่ 16 การต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ จ่ายโวลต์ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร โดยพิจารณาค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กเพิ่ม โดยต่อวงจรตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำเพิ่ม ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์มีดังนี้ $L_s=3.25\text{mH}$ $L_{md}=69.37\text{mH}$ $L_{mq}=166.74\text{mH}$ $R_c=1,999.8\Omega$ $R_{eq}=6.46\Omega$ $J=3.37\text{mKg}\cdot\text{m}^2$ $B=10.15\mu\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ และ $\lambda_{PM}=0.634\text{V}\cdot\text{s}$



รูปที่ 16 การต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ไฟฟ้า

ดำเนินการจำลองสถานการณ์ โดยควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสเท่ากับ 200 V และเริ่มหมุนความเร็วรอบที่ 200 rpm ที่แรงบิด 0.5 Nm แล้วเพิ่ม

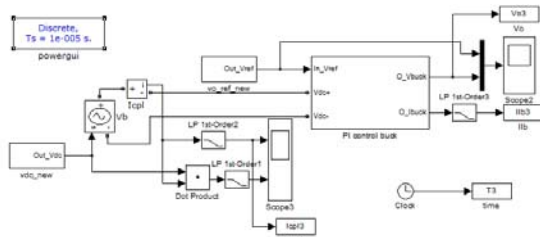


รูปที่ 17 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าที่บัส 200 V

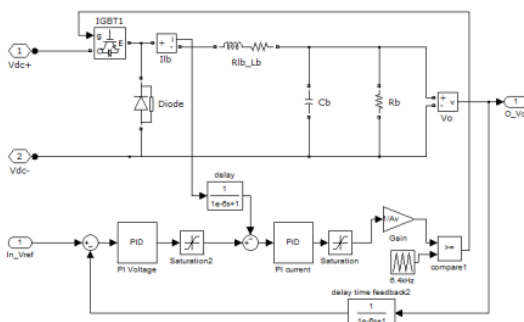
ความเร็วรอบทุกๆ เวลา 0.2 วินาที ครั้งละ 100 rpm ที่แรงบิด 1 Nm จนความเร็วรอบถึง 500 rpm และที่เวลา 1.0 วินาที เพิ่มความเร็วรอบเท่ากับ 550 rpm แล้วเพิ่มแรงบิดเป็น 2 และ 3 Nm ที่เวลา 1.2 และ 1.4 วินาที

ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 17 ประกอบไปด้วย ผลตอบสนองของความเร็วรอบ (ω) กระแสไฟฟ้าบนแกนดักคิว (I_{sd} I_{sq}) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{CPL_P}) โดยเส้นสีเทาอ่อนหนา เป็นการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 14 ในส่วนเส้นสีเทาเข้มจากแบบจำลองดังสมการที่ (8) และ (9) ส่วนเส้นสีดำประเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ที่มีค่าเริ่มต้นในแต่ละจุดการทำงาน จากสมการดังกล่าว การเปรียบเทียบผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ทั้งการเปลี่ยนแปลงแรงบิด ส่วนการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL_P}) ปรากฏความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

4.3 การจำลองสถานการณ์ของวงจรแปรผันแบบบัก



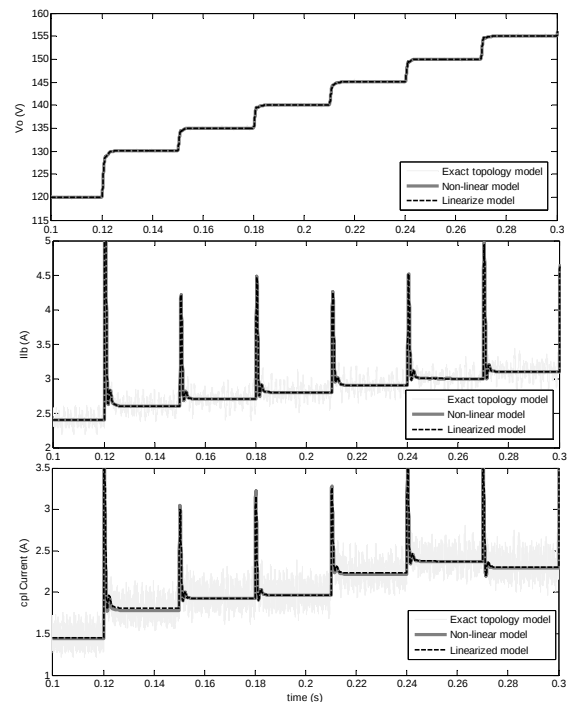
รูปที่ 18 การต่อวงจรแปรผันแบบบัก



รูปที่ 19 รายละเอียดของวงจรแปรผันแบบบัก

ดำเนินการต่อวงจรดังรูปที่ 18 เป็นการต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบวงจรแปรผันแบบบัก ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีการควบคุมเป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส และต่อสัญญาณควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงกับวงจรแปรผันแบบบัก ที่มีโหลดความต้านทาน พร้อมวัดสัญญาณต่างๆ สำหรับรูปที่ 19 เป็นการต่อวงจรภายใน โดยมีวัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต บ้อนเข้าวงจรการ

ควบคุมแบบพีไอทั้งอุปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อไปควบคุมการสวิตช์ที่ไอจีบีที โดยมีค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมดังนี้ $K_{pv}=0.24$ $K_{iv}=21.71$ $K_{pib}=0.53$ $K_{iib}=3,789.92$ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัก $L_b=5.0$ mH $R_{Lb}=0.1$ Ω $R_{load}=50$ Ω และ $C_b=270.0$ μ F



รูปที่ 20 ผลการจำลองของวงจรแปรผันแบบบัก

ดำเนินการจำลองสถานการณ์ โดยเริ่มจากการป้อนที่แหล่งจ่ายให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสเท่ากับ 200 V และควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเริ่มต้นเท่ากับ 120 V จนถึงเวลา 0.12 วินาทีได้ทำการเพิ่มแรงดันเป็น 130 V หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นทีละ 5 V จนถึง 155 V จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_b) เพิ่มขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าที่บ้อนวงจรแปรผันแบบบัก (I_{CPL_B}) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งในช่วงเวลาที่มากกว่า 0.27 วินาทีที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็น 210 V กระแสไฟฟ้าจึงลดลง ซึ่งในทางกลับกันในช่วงเวลา 0.21 ถึง 0.27 วินาที มีการลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสลงเหลือ 190 V ทำให้กระแสไฟฟ้าที่บ้อนวงจรมีค่ามากขึ้น ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปรผันแบบบัก แสดงดังรูปที่ 20 โดยเส้นสีเทาอ่อนหนา เป็นผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 18 ส่วนเส้นสีเทาเข้มได้จากแบบจำลองดังสมการที่ (13) และ (14) ส่วนเส้นสีดำประเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ที่มีค่าเริ่มต้นใน

แต่ละจุดการทำงาน จากผลการตอบสนองในรูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่า ผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณมีความสอดคล้องกัน ทั้งการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่บัส และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

5. สรุป

ณ ปัจจุบันโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีผลกระทบต่อเสถียรภาพ ดังนั้นในบทความนี้ได้ดำเนินการพิสูจน์แบบจำลองของระบบ โดยวิธีดีคิวกับวิธีการปริภูมิสถานะเฉลี่ยทั่วไป สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปลงตามเวลา ทั้งของวงจรเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร และวงจรแปรผันแบบบัคค์ พร้อมกับการนำเสนอวิธีการจำลองสถานการณ์ของวงจรเสมือนจริงด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้เปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ มีผลตอบสนองระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีผลสอดคล้อง ดังนั้นการนำแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัส ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ฯ และใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป ส่วนแบบจำลองของระบบที่ได้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าทั้งสองฝั่ง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกับระบบ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัย จากทุนการศึกษาต่อภายในประเทศ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุนการศึกษาจากกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ผลงานเครื่องจักรกลไฟฟ้าและควบคุม (PEMC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive system: definition, modeling, stability, and control of power electronics converter and motor drives", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, July 2006.
- [2] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modeling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, 29 June – 2 July 2008, pp. 19-24,
- [3] Y. A-R. I. Mohamed, A.A.A. Radwan, and T.K. Lee, "Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation", *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 59, no. 12, pp. 4523-4536, December 2012.
- [4] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converter using the generalized state-space averaging approach", *IEEE Trans. on Circuit and System.*, vol. 44, pp. 767-770, August 1997.
- [5] T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Mathematical of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter", *International Review on Modeling and Simulations*, pp. 1426-1439, August 2011.
- [6] R. Monajemy and R. Krishnan, "Control and dynamics of constant-power-loss-based operation of permanent magnet synchronous motor drive system". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 48, no. 4, pp. 839-844, August 2001.
- [7] R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives.", CRC Press, 2010, pp. 226-276.
- [8] K. Suthamno and S. Sujitjorn, "Modelling of permanent magnet synchronous motor incorporating core-loss", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.*, vol. 4, no. 17, pp. 2846-2853, September 2012.