



การวิเคราะห์โลกลำกำลังเชิงซ้อน จุดทำงาน และเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

An Analysis of the Locus of Complex Power, Operating Point and Stability on the 3 Phase Synchronous Machine

ณัฐพงศ์ พันธนะ¹ อานนท์ สิงห์เสถียร¹ และ ปิยะภัทร พ่วงศรี²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

²โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Nattapong phanthuna¹ Arnon Singhasathein¹ and Piyapat pongsri²

¹Department of Electrical Engineering, Faculty Engineering, Rajamangala University of Technology Phra-Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangkok, Thailand, 10800

²Thai-German Pre-Engineering School, King Mongkut's University of Technology North-Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangkok, Thailand, 10800

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : nattapong.p@rmutp.ac.th, arnon.si@rmutp.ac.th, piyapatpoung@cit.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้กล่าวถึงการจำลองและประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของโลกลำกำลังเชิงซ้อน จุดทำงาน และเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส โดยการจำลองดังกล่าวจะแสดงผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel เนื่องจากเป็นโปรแกรมปฏิบัติการพื้นฐานอย่างง่ายและที่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไป ซึ่งผลลัพธ์จากการจำลองที่ได้จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟฟิค (graphical) โดยลักษณะของกราฟฟิคที่ได้ดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงจุดทำงาน (operating point) และขีดจำกัดเสถียรภาพ (stability limit) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟสตามลำดับ นอกจากนี้ประโยชน์ของงานวิจัยในบทความฉบับนี้คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเบื้องต้นในการออกแบบและการศึกษาถึงพฤติกรรมของของเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

คำสำคัญ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส, รูปแบบของโลกลำกราฟฟิค, ความสัมพันธ์โลกลำกำลังเชิงซ้อน

Abstract

This paper proposes the simulation and application of mathematical equations which concern the locus of complex power, operating point and stability of the three phase synchronous machine. The results of simulation can be illustrated through Microsoft excel, a popular platform for general computing. Moreover, the simulation results of the locus of complex power can be visualized graphically. Such visualization, once analyzed, can estimate the operating point and stability limit of the three phase synchronous machine, respectively. In addition, the proposed method can be utilized in designing and studying of the characteristic of stability of the three phase synchronous machine.

Keywords: the three phase synchronous machine, stability limit, operating point, the locus of complex power.

1. บทนำ

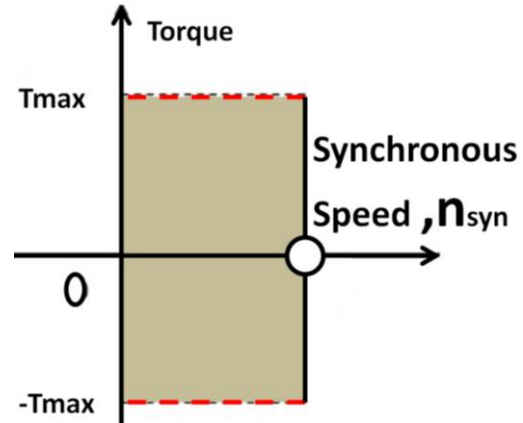
เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส (3 phase synchronous machine) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง กล่าวคือมักจะถูกใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1] โดยมีสาเหตุอันเนื่องมาจากเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะความเร็วคงที่ ซึ่งเรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed, n_{syn}) อีกทั้งยังมีแรงบิดสูงสุดคงที่ (constant maximum torque, T_{max}) ตามลำดับ โดยในที่นี้จะสามารถแสดงให้เห็นถึงกราฟคุณลักษณะสำคัญคือความเร็วซิงโครนัสและแรงบิดสูงสุดคงที่ได้ดังรูปที่ 1 [1-2]

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะมีโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) ตามลำดับ โดยในส่วนของสเตเตอร์จะเป็นโครงสร้างหลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และจะมีการติดตั้งขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) ที่สเตเตอร์อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของโรเตอร์จะเป็นโครงสร้างสำคัญที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนได้อย่างอิสระ โดยโรเตอร์จะเป็นส่วนที่อยู่ภายในสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2

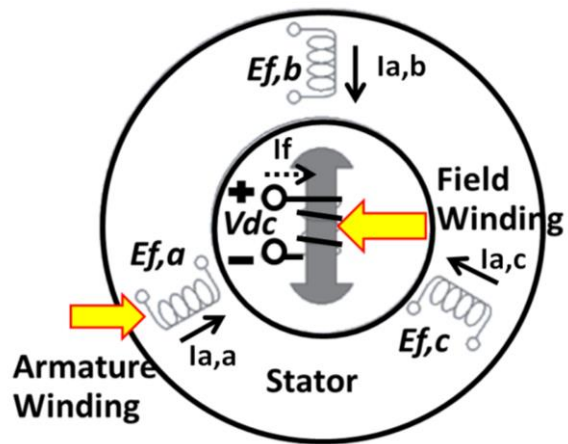
สำหรับในส่วนของโรเตอร์จะมีการติดตั้งขดลวดสนาม (field winding) ซึ่งเป็นขดลวดสำคัญที่จะต้องถูกกระตุ้น (excited) ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ซึ่งจากผลการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) ภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้างดงาม ซึ่งมีความสม่ำเสมอสูง [2] โดยอิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุนที่มีความสม่ำเสมอสูงจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสลับที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เฟส a, b, c คือ (E_{fa} , E_{fb} , E_{fc}) ตามลำดับ นอกจากนี้ในทางอุดมคติจะพิจารณาให้ความเร็วของโรเตอร์ดังกล่าว มีความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัสอีกด้วย [1-3]

จากลักษณะโครงสร้างในรูปที่ 2 ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระแสสนาม (I_f) และกระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) ที่เฟส a, b, c ตามลำดับ โดยกระแสทั้งสองประเภทจะเป็นตัวกำหนดถึงขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนาม

(field winding) และขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) [3-5] ซึ่งขีดจำกัดความร้อนดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส อย่างยิ่ง



รูปที่ 1 คุณลักษณะของความเร็วซิงโครนัสและแรงบิดสูงสุด



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส 3 เฟส

จากความสัมพันธ์ของเสถียรภาพที่มีความเกี่ยวข้องระหว่างกระแส I_f และกระแส I_a ดังนั้นบทความฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษาและประเมินขีดจำกัดเสถียรภาพที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส โดยในที่นี้จะทำการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์ดังกล่าวในรูปของโลกรัสกำลังเชิงซ้อน ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เนื่องจากโปรแกรม Microsoft Excel เป็นโปรแกรมพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ทั่วไป



สำหรับเนื้อหาสำคัญที่จะถูกนำเสนอในบทความฉบับนี้ จะสามารถแบบเรียบเรียงตามลำดับต่างๆดังต่อไปนี้คือ ในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S), กำลังไฟฟ้าจริง (P) รวมทั้ง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ตามลำดับ และในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของโลกลักกำลังเชิงซ้อนของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแบบ 3 เฟส ซึ่งมีความ เกี่ยวข้องโดยตรงกับพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่ เกิดขึ้นภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (S, P, Q), แรงดันที่ขั้วของ เครื่องจักรกลไฟฟ้า (V_t), กระแส I_f และกระแส I_a เป็นต้น

สำหรับในหัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบและ วิเคราะห์โลกลักกำลังเชิงซ้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสแบบ 3 เฟส ในรูปของอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ และทำการแสดงผลลัพธ์ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel

ในส่วนสุดท้ายของบทความฉบับนี้คือหัวข้อที่ 5 จะเป็นการกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความฉบับนี้

2. คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับ บัสอนันต์ (infinite bus) ซึ่งมีค่าระดับ แรงดันคงที่ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ก็มีขีดจำกัดในส่วนของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับบัสอนันต์ กล่าวคือการจ่ายกำลังไฟฟ้าง่ายๆจะต้องไม่มีสูญเสียการ เกาะติดความเร็วซิงโครนัสเกิดขึ้น (Lose synchronism) [1]-[2] ดังนั้นในทางอุดมคติจึงทำการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า ส่งผ่านให้กับบัสอนันต์ที่สภาวะคงตัว (steady state)

โดยในเบื้องต้นจะต้องกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของ แบบจำลองที่เป็นองค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์การส่งผ่าน กำลังไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ [1]-[3]

เมื่อ I_f คือ กระแสสนาม

V_{dc} คือแรงดันกระแสตรงที่ใช้กระตุ้นขดลวดสนาม

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

E_f คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

δ คือ มุมกำลังหรือมุมของแรงดันเหนี่ยวนำที่ขด อาร์เมเจอร์

R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

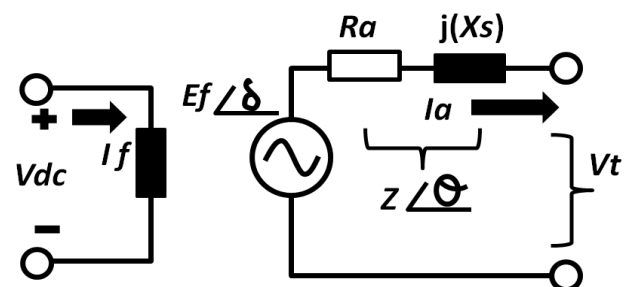
X_s คือ ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อเฟส

Z_s คือ อิมพีแดนซ์ของวงจรต่อเฟส

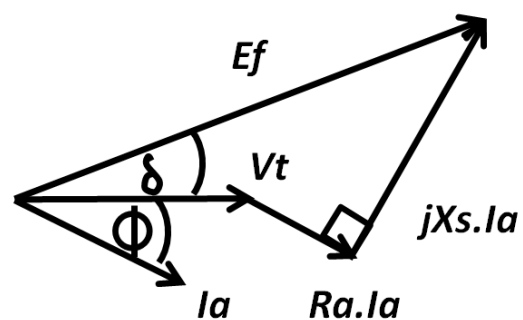
θ_s คือ มุมอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลต่อเฟส

V_t คือ แรงดันต่อเฟส ที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

ϕ คือมุมระหว่าง E_f และ I_a หรือมุมตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 3 พารามิเตอร์วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้า แบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส [2]



รูปที่ 4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมต่อเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้า แบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

จากพารามิเตอร์ต่างๆในรูปที่ (3) ถึง (4) จะได้ผลลัพธ์ของ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S) ที่ขั้ว V_t ดังสมการที่ (1) คือ

$$S = V_t \cdot I_a^* = P + jQ \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) พารามิเตอร์ I_a^* คือค่าคอนจูเกตของกระแส I_a โดยที่ I_a^* มีเพื่อหาให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบล้าหลัง มีค่าเป็นบวก (+Q) และ P คือค่ากำลังไฟฟ้าจริง ตามลำดับ

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) จะได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อเฟสและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อเฟส ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ (2) และ (3) คือ [2], [3]

$$P = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{Z_s} \cos(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s} \cos(\theta_s) \quad (2)$$

$$Q = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{Z_s} \sin(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s} \sin(\theta_s) \quad (3)$$

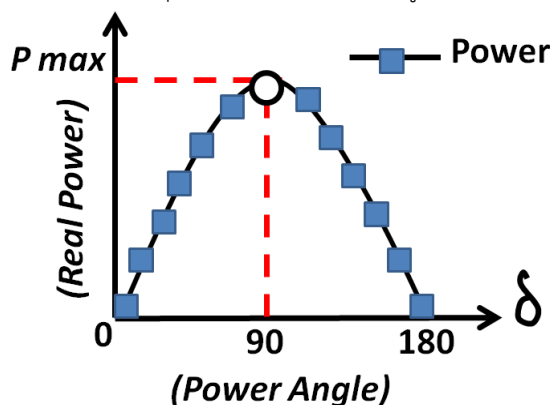
จากสมการที่ (2) และ (3) ในกรณีที่ไม่นับพิจารณาผลของ R_a จะมีผลทำให้ θ_s มีค่าเท่ากับ 90 องศา และจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (4), (5) และ (6) คือ

$$P = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s} \sin(\delta) \quad (4)$$

$$P_{\max} = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s} \quad (5)$$

$$Q = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s} \cos(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{X_s} \quad (6)$$

จากสมการที่ (4) ถึง (6) เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเชิงกราฟ (graphical method) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมกำลัง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5



รูปที่ 5 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าจริงและมุมกำลัง

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่มุมกำลัง (δ) มีค่าเกินกว่า 90 องศา จะมีผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดจนทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส เกิดการสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุน [2-3] ดังนั้นขีดจำกัดของเสถียรภาพที่สถานะคงตัว (stability limit) สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะต้องมีความ δ ไม่เกิน 90 องศา

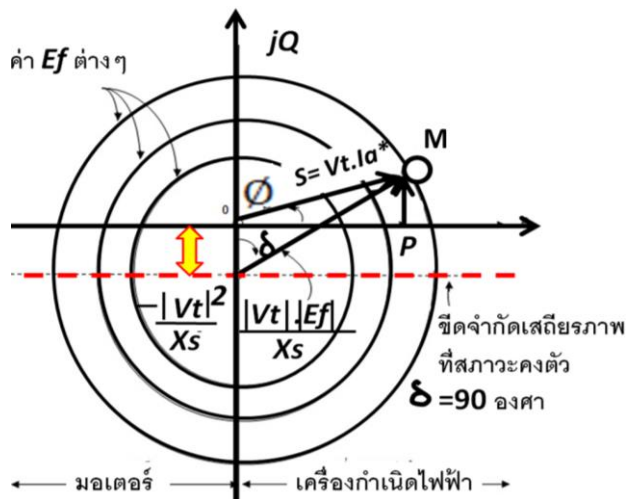
ทั้งนี้จากพารามิเตอร์ของสมการที่ (1) ถึง (6) รวมทั้งความสัมพันธ์ของขีดจำกัดของเสถียรภาพดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะสามารถถูกแสดงในรูปของโลกลักกำลังเชิงซ้อนเพื่อเป็นการประเมินถึงขีดจำกัดของเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ดังแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

3. โลกลักกำลังเชิงซ้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแบบ 3 เฟส

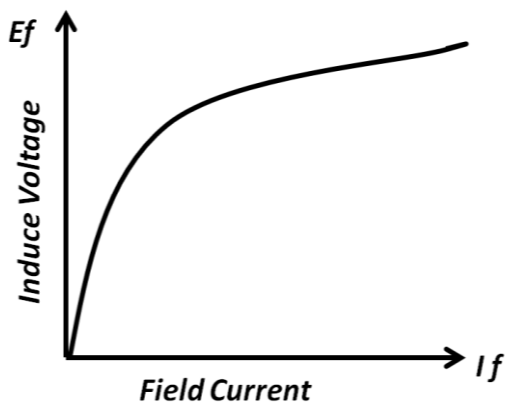
จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ถึง (6) เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อเฟส มาทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของคุณลักษณะทางคณิตศาสตร์เชิงซ้อน จะทำให้ได้พิกัดโลกลักในรูปของระนาบเชิงซ้อน (locus of complex s-plane) ซึ่งโลกลักดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นวงกลม ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 6 ตลอดจนมีความสัมพันธ์ของโลกลักดังต่อไปนี้ [6]

- โลกลักวงกลมมีรัศมีเท่ากับ $P_{\max} = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s}$
- โลกลักวงกลมมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $(0, -\frac{|V_t|^2}{X_s})$
- M คือจุดทำงาน, δ คือมุมกำลัง และ ϕ คือมุมตัวประกอบกำลัง
- ขนาดวงกลมของโลกลักจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของ E_f โดยค่า E_f จะแปรผันตามขนาดของกระแสสนาม (I_f) ดังแสดงในรูปที่ 7
- เส้นประในแนวนอน คือค่าขีดจำกัดกำลังสูงสุดในสถานะคงตัว (ตัดผ่านจุดศูนย์กลาง) โดยจะมีค่าขีดจำกัดที่ δ

ไม่เกิน 90 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\frac{|V_t|^2}{X_s}$



รูปที่ 6 โลกกำลังเชิงซ้อนต่อเฟสที่นำเสนอมอเตอร์

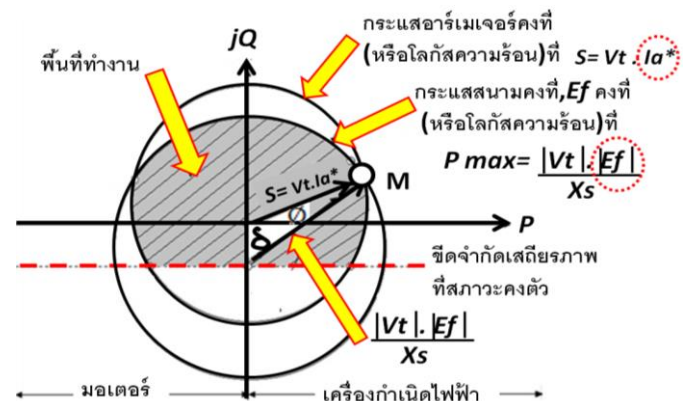


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ef และ If [3]

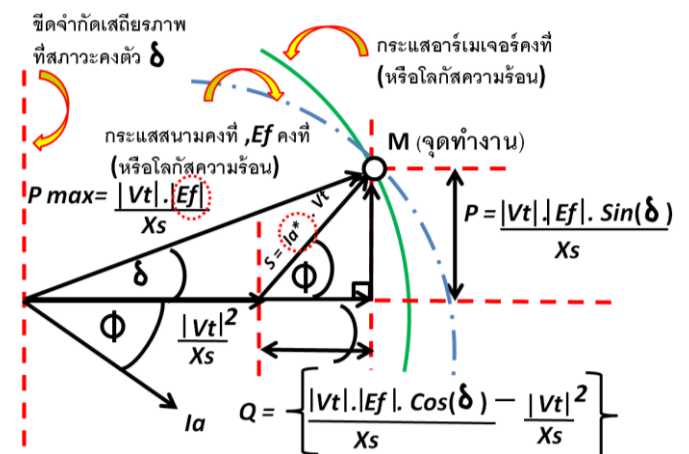
เมื่อนำสมการที่ (1) คือ $S = V_t \cdot I_a^*$ มาร่วมวิเคราะห์กับ โลกกำลังเชิงซ้อนต่อเฟสในรูปที่ 6 จะได้ผลลัพธ์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยวงกลมที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (1) จะมีรัศมีเท่ากับ $S = V_t \cdot I_a^*$ ซึ่งเป็นการสื่อถึงโลกสภาวะร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสอาร์เมเจอร์คงที่ (I_a คงที่) รวมถึงมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับจุดทำงาน (M) ของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ดังสามารถแสดงให้เห็นในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

จากรูปที่ 7 ได้เคยแสดงให้เห็นถึง E_f ซึ่งแปรผันกับขนาดของกระแสสนาม (I_f) ดังนั้นโลกที่เกี่ยวข้องกับ E_f จึงสื่อถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสสนามคงที่ ดังแสดงในรูป

ที่ 8 และ 9 ทั้งนี้กระแสสนาม (I_f) และกระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) จะเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดความร้อนของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส เนื่องจากกระแสทั้งสองประเภทมีผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเกิดความร้อนที่ขดลวดภายในเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ตามลำดับ



รูปที่ 8 พื้นที่ทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัส [2]



รูปที่ 9 จุดทำงาน (M) ที่เหมาะสมของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส [1]-[3]

ดังนั้นการออกแบบและวิเคราะห์โลกของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจึงจำเป็นต้องเลือกจุดทำงาน (M) ที่เหมาะสม กล่าวคือจะต้องเป็นจุดทำงานที่มีความสอดคล้องกันระหว่างขีดจำกัดความร้อนจากกระแส I_f และ I_a รวมถึงขีดจำกัดของเสถียรภาพจากรูปที่ 5 ซึ่งมีมุมกำลังไม่เกิน 90 องศา ตามลำดับ โดยในที่นี้จะสามารถแสดงให้เห็นการออกแบบดังกล่าวให้เห็นในหัวข้อที่ 4

4. การออกแบบและวิเคราะห์โลกกำลังเชิงซ้อน

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ถึง (6) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อนำมาวิเคราะห์และออกแบบให้โมเดลของโลกกำลังจากสมการที่ (1) คือ $S = V_t \bullet I_a^*$ โดยกำหนดให้มีค่าระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อเฟส คือ $V_t = 1 \angle 0^\circ$ unit และกระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟสจะถูกพิจารณาให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่และมีความเป็นเชิงเส้นดังต่อไปนี้คือ $I_a = 4 \angle \phi^0, 6 \angle \phi^0, 8 \angle \phi^0, 10 \angle \phi^0$ unit ตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 10

นอกจากนี้จะออกแบบให้ขีดจำกัดของเสถียรภาพ (stability limit) ที่สภาวะคงตัว ซึ่งมีมุมกำลังไม่เกิน 90 องศา คือเส้นตรงที่มีลักษณะเป็นเส้นประแนวนอน ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ $|V_t|^2 / X_s = -4$ unit

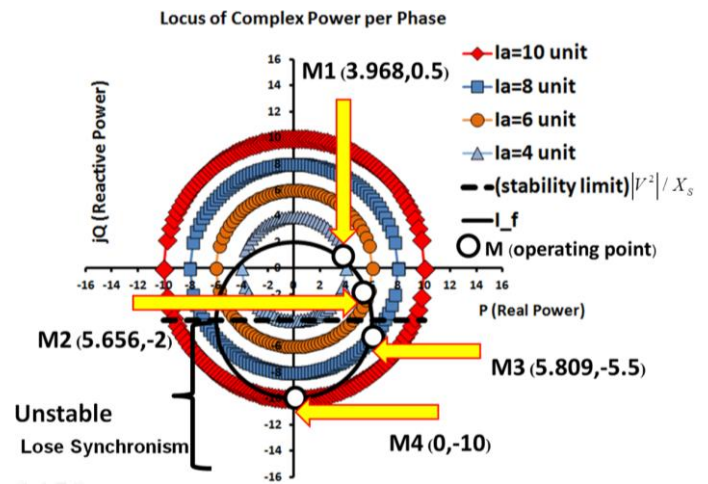
อีกทั้งโลกสวกลมที่ขึ้นอยู่กับแปรผันตามขนาดของกระแสสนาม (I_f) กำหนดให้มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (0, -4) และรัศมีคงที่เท่ากับ $|V_t| \bullet |E_f| / X_s = 4$ unit (วงกลมเส้นทึบ I_f) โดยจากข้อกำหนดในการออกแบบดังกล่าวจะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 เป็นการแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบโลกกำลังเชิงซ้อน โดยใช้การเขียนอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (1) ถึง (6) และแสดงผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโลกสวกลมของ $S = V_t \bullet I_a^*$ จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีตามค่ากระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟส (I_a) ที่เปลี่ยนแปลงไป คือ $4 \angle \phi^0, 6 \angle \phi^0, 8 \angle \phi^0, 10 \angle \phi^0$ unit ตามลำดับ ในขณะที่โลกสวกลมที่ขึ้นอยู่กับแปรผันตามขนาดของกระแสสนาม (I_f) จะมีรัศมีที่คงที่เท่ากับ 4 unit เสมอ

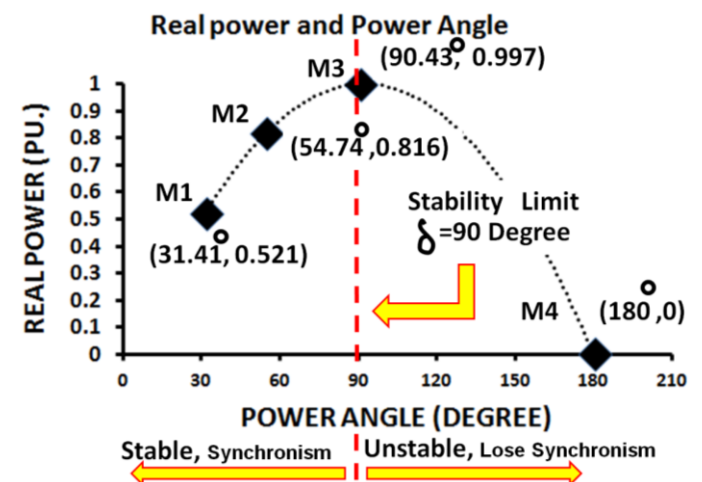
แต่อย่างไรก็ตาม จากผลลัพธ์ในรูปที่ 10 จะต้องทำการหาจุดตัดระหว่างโลกสวกลมของสมการที่ (1) คือ $S = V_t \bullet I_a^*$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีตาม I_a และโลกสวกลมของกระแสสนาม (I_f) ที่มีขนาดรัศมีคงที่ โดยในที่นี้ความสัมพันธ์ของจุดตัดดังกล่าวจะอยู่ในรูปของสมการที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาผลเฉลยของจุดตัดต่างๆด้วยเทคนิคระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) แบบ Bisection Method [7]-[8] ซึ่งจะได้ค่าผลเฉลยของจุดตัดคือ $M_1(3.968, 0.5)$, $M_2(5.656, -2)$, $M_3(5.809, -5.5)$ และ $M_4(0, -10)$ ตามลำดับ

โดยผลลัพธ์ของจุดทำงานทั้ง 4 จุด คือ M_1, M_2, M_3, M_4 ได้ถูกกำกับขอบเขตให้มีค่าไม่เกินขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ ด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ถึง (6) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3

นอกจากนี้เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้และค่าผลลัพธ์ของจุดตัดต่างๆดังกล่าว มาคำนวณตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (4) ถึง (6) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและมุมกำลัง (δ) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 11 โดยผลลัพธ์ของรูปที่ 11 เป็นการแสดงถึงเสถียรภาพการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเชิงโครนัสชนิด 3 เฟส



รูปที่ 10 โลกกำลังเชิงซ้อนที่ทำการออกแบบ

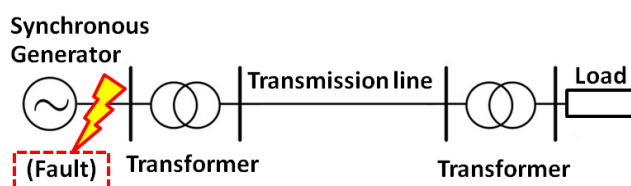


รูปที่ 11 คุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและมุมกำลังที่ออกแบบ



จากผลลัพธ์ในรูปที่ 10 และ 11 ได้แสดงให้เห็นว่า ที่จุดตัด M_1 และ M_2 สามารถใช้ออกแบบเป็นจุดทำงานได้ในทางอุดมคติ เนื่องจากเป็นจุดที่ไม่เกินขีดจำกัดของเสถียรภาพ (ไม่เกิน 90 องศา) แต่อย่างไรก็ตามที่จุดตัด M_3 และ M_4 เป็นจุดทำงานที่เกินขีดจำกัดของเสถียรภาพ (เกิน 90 องศา) ซึ่งตำแหน่งของทั้งสองจุดดังกล่าว ทำให้เกิดความไม่เสถียรหรือสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสของโรเตอร์ (Lose synchronism) ดังนั้นกรณีนี้จึงไม่สามารถนำมาออกแบบใช้งานได้ทางปฏิบัติ เนื่องจากผลของกระแสอาร์เมเจอร์มีค่าสูงมากเกินไป ซึ่งทำให้จุดทำงานเกินขีดจำกัดของเสถียรภาพที่กำหนดหรือมีมุมกำลังมากกว่า 90 องศาตามลำดับ [6]

โดยจากกรณีศึกษาดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงในทางปฏิบัติคือ การเกิดกระแสลัดวงจรผิดปกติ (fault) ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 12 ซึ่งจากผลดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วแวบ (sub-transient short circuit current) และกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราว (transient short circuit current) ซึ่งมีขนาดกระแสที่สูงกว่ากระแสปกติที่สภาวะอยู่ตัว (steady state current) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 13



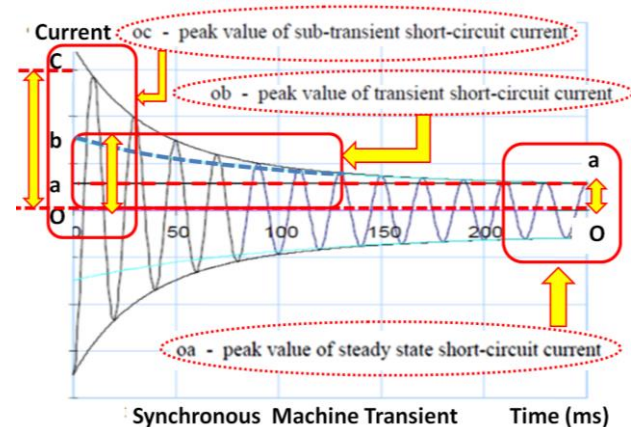
รูปที่ 12 การเกิดกระแสลัดวงจรผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 13 ช่วงเวลาที่เกิดกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วแวบจนกระทั่งถึงกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราว จะมีขนาดกระแสที่สูงในช่วงเวลาหลายสิบวินาที ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าที่กระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติดังกล่าวจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้นในช่วงที่เกิดกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติ จึงมีโอกาสที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสของโรเตอร์หรือมีมุมกำลังมากกว่า 90 องศา

ซึ่งกรณีนี้เป็นปัญหาสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการส่งจ่ายพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องไม่มีสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสเกิดขึ้น

สำหรับ ประโยชน์สำคัญของบทความฉบับนี้ที่ได้ถูกนำเสนอคือ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ได้จริง ที่ขอบเขตไม่เกินขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์

โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าได้ทราบถึงพารามิเตอร์จริงอย่างครบถ้วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ได้แก่ E_f , V_t , I_f , I_a , X_s ก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของจุดทำงาน (M) ซึ่งเกี่ยวข้องถึงเสถียรภาพที่สมจริงอย่างยิ่ง



รูปที่ 13 การเกิดกระแสลัดวงจรผิดปกติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

5. สรุปผล

การออกแบบโลกซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ควรออกแบบให้มีจุดทำงาน (M) ที่เหมาะสม กล่าวคือ จะต้องมียุคทำงานไม่เกินขีดจำกัดของเสถียรภาพ ($|V|^2 / X_s$) หรือมีค่ามุมกำลัง (δ) ที่ไม่เกิน 90 องศาตามลำดับ โดยกรณีที่กำลังถึงในการออกแบบโลกซ์สำหรับบทความฉบับนี้จะเป็นการอ้างอิงถึงในช่วงอุดมคติที่สภาวะอยู่ตัวของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส เท่านั้น และมีขอบเขตไม่เกินขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้การจำลองดังกล่าวจะแสดงผลผ่านโปรแกรม Microsoft

Excel เนื่องจากเป็นโปรแกรมปฏิบัติการพื้นฐานอย่างง่าย และที่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไป ตลอดจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเบื้องต้นในการ ออกแบบและการศึกษาถึงพฤติกรรมของของเสถียรภาพของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยในด้านต่างๆ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ. มทร. พระนคร) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งคณะผู้เขียนบทความจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] บัลลังก์ เนียมมณี, และ สุขสันต์ หวังสัจฉริยะ “เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ AC Machines” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2555.
- [2] P. C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc 1997.
- [3] Stephen J. Chapman, Electrical Machinery Fundamental, Fourth Edition, McGraw-Hill International Edition, 2005.
- [4] ณัฐพงศ์ พันธนะ, ศุภโชค จินดาพล, กันตนิรันดร์ รื่นสัมฤทธิ์ อานนท์ สิงห์เสถียร “ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบชนิดเหนี่ยวนำ” การประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2016.
- [5] ณัฐพงศ์ พันธนะ, ศุภโชค จินดาพล, กันตนิรันดร์ รื่นสัมฤทธิ์ อานนท์ สิงห์เสถียร และ พูนศรี วรรณการ “การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ในสภาวะอยู่ตัว” การประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2016.
- [6] ณัฐพงศ์ พันธนะ, ชนันรัตน์ วีระเพ็ชร, วงศธร สุขสมสังข์, อานนท์ สิงห์เสถียร และ สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ “การวิเคราะห์โลกกำลังเชิงซ้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส” การประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2016.

- [7] R.E. Larson, R.P. Hostetler and B.H. Edward, Calculus and Analytic Geometry 5th. Canada: D.C. Health, 1994
- [8] S.C. Chapra and R.P. Canale, Numerical Methods for Engineers. Singapore: McGraw-Hill (Asia), 2006