

การวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่และภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส แบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Transient and Steady State Analysis of a Two-phase Self-excited Induction Generator Using Mathematical Model

ทิวฤทธิ์ สัตยธรรม^{1*} และ วิจิตร กิณเรศ²
Tiraput Satayatum^{1*} and Vijit Kinnares²

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์และออกแบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสในภาวะชั่วครู่และภาวะคงตัวบนแกนอ้างอิงหนึ่งสองเฟส ($\alpha\beta$) และวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการสร้างแรงดันเพื่อนำมาออกแบบตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับใช้กระตุ้นเครื่องกำเนิด โดยในการทดสอบได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับการทดสอบจริงในห้องทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดสอบจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส ค่าความเหนี่ยวนำร่วม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

This paper describes mathematical model of two-phase self-excited induction generator using

Matlab/Simulink. The purpose is to analyze the transient and steady state characteristics of two-phase self-excited induction generator in stationary reference frame ($\alpha\beta$). The analysis is effect of magnetizing inductance in built-up voltage, in order to compute and design suitable value of excitation capacitor. The experimental and simulated results for a transient and steady-state voltage are in close agreement.

Keywords: Two-phase Self-excited Induction Generator, Magnetizing Inductance, Mathematical Model

1. บทนำ

ในปัจจุบันการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางโดยในงานวิจัย [2] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสนั้นยังไม่มี การนำเสนอแบบจำลองทาง

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* Corresponding Author, Tel. 08-4874-8364, E-mail: tiraputs@gmail.com

คณิตศาสตร์มาก่อน ดังนั้นในบทความนี้ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบหนึ่งเฟสนำมาต่อเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสองเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยโครงสร้างทั่วไปจะประกอบไปด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ตัวขับเคลื่อนกำลัง ชุดโพลิตสมดุลและชุดตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในการสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 1

ในการที่จะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้นั้นจะต้องมีสองเงื่อนไขสำคัญที่จะต้องพิจารณาคือ

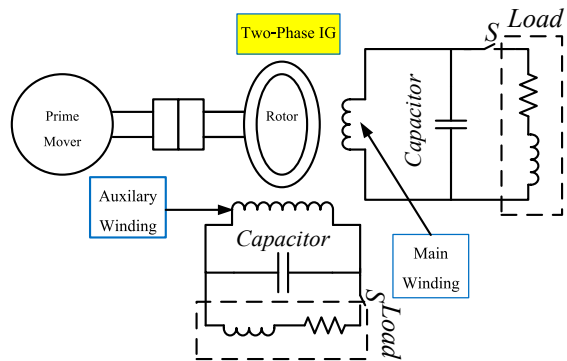
1. จะต้องมีส่วนแม่เหล็กที่ตกค้างในตัวโรเตอร์เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกระตุ้นด้วยตัวเอง
2. จะต้องเลือกค่าตัวเก็บประจุกระตุ้นให้มีค่าเพียงพอในการสร้างแรงดันเหนี่ยวนำเริ่มต้น

บทความนี้ได้เสนอการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยมีข้อดีเพื่อจำลองแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในภาวะชั่วคราวและภาวะคงตัวและเมื่อภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

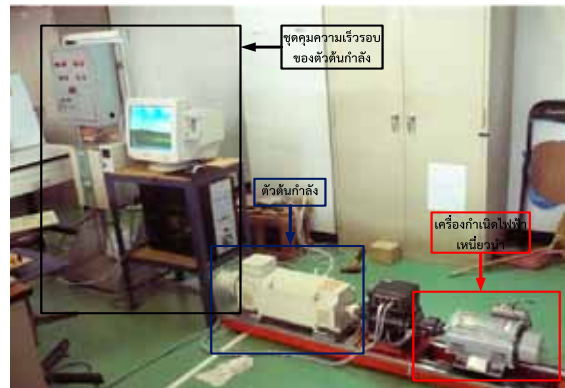
2. หลักการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ในการสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

ในบทความนี้ได้มีการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบกรงกระรอกยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น (SCL-KR) ขนาด 1.5kW, 1450rpm, 220V, 10.4A, 50Hz, 4 poles มาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบไม่สมมาตรโดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวต้นกำลังขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบได้โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างตัวต้นกำลังกับเครื่องกำเนิดแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส



รูปที่ 2 ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

2.2 การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

ในการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำอ้างอิง [1] และ [3] เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบจริงในห้องทดสอบโดยจะมีการทดสอบแบบไร้อหลด (No-load Test) และการทดสอบยึดโรเตอร์ให้อยู่นิ่งทั้งขดลวดหลักและขดลวดช่วย (Blocked Rotor Test) และการทดสอบด้วยไฟตรงทั้งขดลวดหลักและขดลวดช่วย (DC-test) โดยจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
หนึ่งเฟสจากการทดสอบในหน่วยโอห์ม

พิกัด(kW)	R_{sa}	$R_{s\beta}$	R_{ra}	$R_{r\beta}$	X_{sa}	$X_{s\beta}$	X_{ra}	$X_{r\beta}$
1.5	5.1	1.49	3.666	1.495	6.365	1.945	6.365	1.945

โดยที่

$R_{s\beta}$ คือค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ที่ขดลวดหลัก

R_{sa} คือค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ที่ขดลวดช่วย

$R_{r\beta}$ คือค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ที่ขดลวดหลัก

R_{ra} คือค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ที่ขดลวดช่วย

$X_{s\beta}$ คือค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์ที่ขดลวดหลัก

X_{sa} คือค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์ที่ขดลวดช่วย

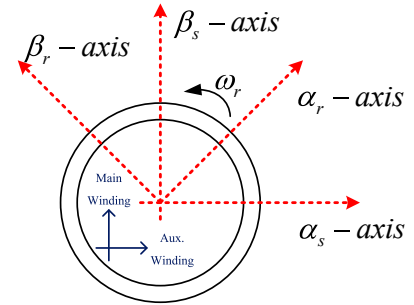
$X_{r\beta}$ คือค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านโรเตอร์ที่ขดลวดหลัก

X_{ra} คือค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านโรเตอร์ที่ขดลวดช่วย

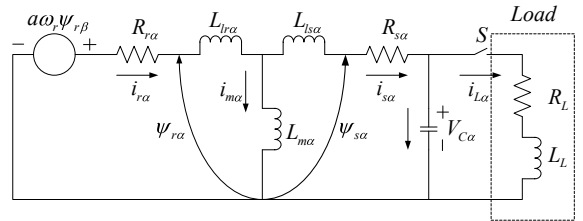
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสจะประกอบด้วยขดลวดสองชุดที่ไม่สมมาตร โดยขดลวดที่มีจำนวนรอบมากกว่าจะถูกเรียกว่าขดลวดช่วย และขดลวดที่มีจำนวนรอบน้อยกว่าจะถูกเรียกว่าขดลวดหลัก โดยขดลวดแต่ละชุดจะถูกวางทำมุมกัน 90 องศาแสดงในรูปที่ 3 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบไม่สมมาตรโดยกำหนดให้ขดลวดหลักวางอยู่บนแกน (β) และขดลวดช่วยวางอยู่บนแกน (α)

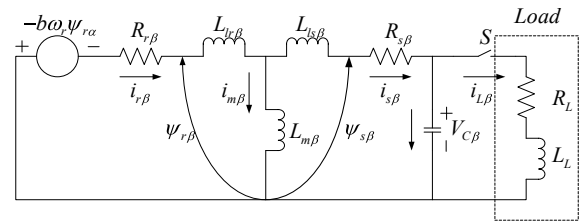
ในรูปที่ 4 ได้แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่ง (Stationary Reference Frame: $\alpha\beta$) โดยที่วงจรสมมูลในรูปที่ 4 ยังไม่มีการต่อโหลดเข้าทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ได้ในสมการที่ (1) โดยแยกตามแกนอ้างอิง โดยในรูปที่ 4(ก) แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกน (α) และในรูปที่ 4 (ข) จะแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกน (β) โดยจะยังไม่มีต่อโหลดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิด



รูปที่ 3 ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบไม่สมมาตร



(ก) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกน (α)



(ข) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกน (β)

รูปที่ 4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิง

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sa} + pL_{sa} + \frac{1}{pC} & 0 & pL_{ma} & 0 \\ 0 & R_{s\beta} + pL_{s\beta} + \frac{1}{pC} & 0 & pL_{m\beta} \\ pL_{ma} & a\omega_r L_{m\beta} & R_{ra} + pL_{ra} & aL_{r\beta}\omega_r \\ -b\omega_r L_{ma} & pL_{m\beta} & -bL_{ra}\omega_r & R_{r\beta} + pL_{r\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{s\beta} \\ I_{ra} \\ I_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Ca0} \\ V_{C\beta0} \\ K_\alpha \\ K_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

กำหนดให้ $p = \frac{d}{dt}$, $a = \frac{N_\alpha}{N_\beta}$, $b = \frac{N_\beta}{N_\alpha}$, K_α, K_β คือค่าคงที่ซึ่งแทนแรงดันจากสนามแม่เหล็กตกค้างในตัวโรเตอร์ และ $V_{C\alpha\beta 0}$ คือแรงดันเริ่มต้นของตัวเก็บประจุโดยเงื่อนไขในขณะที่มีพลังงานกลเป็นต้นกำลังขับทำให้โรเตอร์หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างแรงดันจากสนามแม่เหล็กตกค้างในตัวโรเตอร์ได้มาจากสมการ

$$aw_r\psi_{r\alpha} = aw_rL_{ma}i_{s\alpha} + aw_rL_{r\alpha}i_{r\alpha} + aw_r\psi_{r\alpha 0} \quad (2)$$

$$-bw_r\psi_{r\beta} = -bw_rL_{ma}i_{s\beta} - bw_rL_{r\beta}i_{r\beta} - bw_r\psi_{r\beta 0} \quad (3)$$

กำหนดให้ $aw_r\psi_{r\alpha 0}$, $-bw_r\psi_{r\beta 0}$ คือแรงดันเหนี่ยวนำเริ่มต้นที่เกิดจากสนามแม่เหล็กตกค้างในตัวโรเตอร์

ดังนั้นเมื่อนำโพลต์มาต่อทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4 เมื่อปิดสวิตช์ S สามารถเขียนสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและโหลดบนแกน ($\alpha\beta$) ได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$i_{C\alpha\beta} = i_{s\alpha\beta} - i_{L\alpha\beta} \quad (4)$$

$$pV_{L\alpha\beta} = pV_{C\alpha\beta} = \frac{i_{C\alpha\beta}}{C} = \frac{i_{s\alpha\beta}}{C} - \frac{i_{L\alpha\beta}}{C} \quad (5)$$

จากสมการแรงดันที่โพลต์เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4 คือ

$$V_{L\alpha\beta} = Ri_{L\alpha\beta} + Lpi_{L\alpha\beta} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านโพลต์ได้บนแกน ($\alpha\beta$) ได้ดังนี้

$$pi_{\alpha\beta} = \frac{V_{L\alpha\beta}}{L} - \frac{R}{L}i_{\alpha\beta} \quad (7)$$

จากนั้นนำสมการที่ (1)-(3) มาเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์และใช้สมการเมตริกซ์ผกผันทำการแก้สมการเพื่อหาสมการอนุพันธ์ของกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสได้ในสมการที่ (8)

$$p \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \frac{L_{ra}R_{sa}}{k1} & \frac{aw_rL_{ma}L_{m\beta}}{k1} & \frac{R_{ra}L_{ma}}{k1} & \frac{aw_rL_{ma}L_{r\beta}}{k1} \\ \frac{bw_rL_{ma}L_{m\beta}}{k2} & \frac{L_{r\beta}R_{r\beta}}{k2} & \frac{bw_rL_{m\beta}L_{ra}}{k2} & \frac{R_{r\beta}L_{m\beta}}{k2} \\ \frac{R_{sa}L_{ma}}{k1} & \frac{aw_rL_{m\beta}L_{sa}}{k1} & \frac{R_{ra}L_{sa}}{k1} & \frac{aw_rL_{sa}L_{r\beta}}{k1} \\ \frac{bw_rL_{ma}L_{s\beta}}{k2} & \frac{R_{s\beta}L_{m\beta}}{k2} & \frac{bw_rL_{s\beta}L_{ra}}{k2} & \frac{L_{s\beta}R_{r\beta}}{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-L_{ra}V_{C\alpha} + aw_rL_{ma}\psi_{r\beta 0}}{k1} \\ \frac{-L_{r\beta}V_{C\beta} - bw_rL_{m\beta}\psi_{r\alpha 0}}{k2} \\ \frac{+L_{ma}V_{C\alpha} - aw_rL_{sa}\psi_{r\beta 0}}{k1} \\ \frac{+L_{m\beta}V_{C\beta} + bw_rL_{s\beta}\psi_{r\alpha 0}}{k2} \end{bmatrix} \right\} \quad (8)$$

$$\text{กำหนดให้ } k1 = \frac{1}{L_{ra}L_{sa} - L_{ma}^2}, k2 = \frac{1}{L_{r\beta}L_{s\beta} - L_{m\beta}^2}$$

2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อทำการต่อโพลต์เข้ากับด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดค่าความเหนี่ยวนำร่วม ($L_{m\alpha\beta}$) และค่ากระแสกระตุ้น (i_m) ไม่สามารถพิจารณาให้เป็นค่าคงที่เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไปได้ ซึ่งจากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในห้องทดสอบแบบไร้โหลด (No-load Test) จะสามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของกระแสกระตุ้นได้จากสมการ

$$I_m = \sqrt{(i_{s\alpha} + i_{r\alpha})^2 + (i_{s\beta} + i_{r\beta})^2} / \sqrt{2} \quad (9)$$

และนำค่ากระแสกระตุ้นมาที่ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมในแกน ($\alpha\beta$) โดยสัญลักษณ์จุดเป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับค่ากระแสกระตุ้นที่ได้จากการทดสอบค่าต่างๆและใช้หลักการปรับเส้นโค้งหาค่าความสัมพันธ์ด้วยสมการพหุนามกำลังสี่โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในสมการที่ (10) และ (11) โดยจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่เวลาใดๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำร่วม ($L_{m\alpha\beta}$) มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับ

ค่ากระแสกระตุ้น (I_m)

$$L_{m\alpha} = 0.00005I_m^4 - 0.0011I_m^3 + 0.0093I_m^2 - 0.0342I_m + 0.28 \quad (10)$$

$$L_{m\beta} = -0.00002I_m^4 + 0.0003I_m^3 + 0.0009I_m^2 - 0.0315I_m + 0.22 \quad (11)$$

2.5 การคำนวณและออกแบบขนาดตัวเก็บประจุ

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้นจะต้องมีการออกแบบตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวเก็บประจุอย่างง่ายโดยต่อตัวเก็บประจุในสภาวะไร้อโหลดโดยจะเลยแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์และสเตเตอร์ทำให้พิจารณาได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำ ($V_{m\alpha\beta}$) มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($V_{C\alpha\beta}$) ซึ่งจะสามารถคำนวณและออกแบบตัวเก็บประจุที่เหมาะสมได้จากสมการที่ (12-14)

$$V_{m\alpha\beta} = V_{C\alpha\beta} \quad (12)$$

$$I_{m\alpha\beta} X_{m\alpha\beta} = I_{C\alpha\beta} X_{C\alpha\beta} \quad (13)$$

เมื่อ $I_{m\alpha\beta} = I_{C\alpha\beta}$ ดังนั้นเมื่อแก้สมการจะสามารถคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมบนแกน ($\alpha\beta$) ได้จากสมการที่ 14

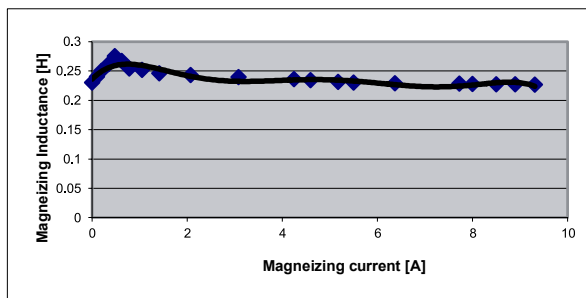
$$C_{\min\alpha\beta} = \frac{1}{\omega_r^2 L_{m\alpha\beta}} \quad (14)$$

จากสมการที่ 14 สามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่อยู่ในช่วงที่ไม่อิ่มตัวโดยพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่มีค่าสูงสุดในรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งสามารถเลือกค่าความเหนี่ยวนำร่วมบนแกน ($\alpha\beta$) ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ

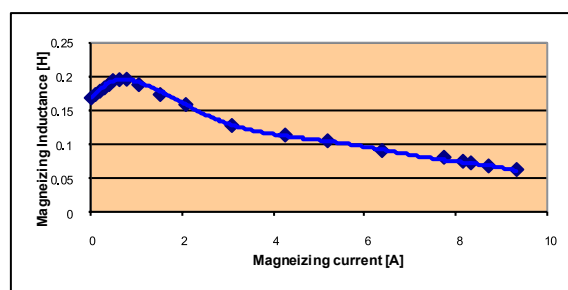
$$L_{m\alpha} = L_{\text{unsaturation}} \cong 0.2747H$$

$$\text{และ } L_{m\beta} = L_{\text{unsaturation}} \cong 0.2070H$$

ดังนั้นขนาดตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุดสำหรับสร้างแรงดันเหนี่ยวนำเริ่มต้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ $C_{\min\alpha} \cong 36.9\mu F$ และ $C_{\min\beta} \cong 49\mu F$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้นในแกน (α)



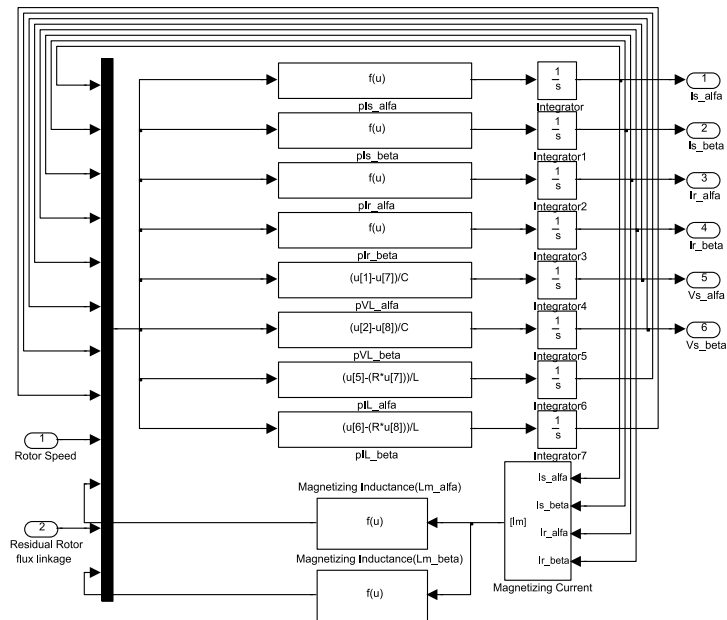
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้นในแกน (β)

3. แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

บทความนี้ได้ออกแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์โดยนำสมการที่ (8) ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 มาออกแบบสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 7

4. ผลการทดลอง

ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของผลการจำลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบจริงทั้งในภาวะชั่วคราวและภาวะคงตัวโดยได้ทำการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกรงกระรอกโดยมีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2 โดยเลือกค่า $C_{\alpha\beta} = 50\mu F$ เพื่อทำให้ค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าแรงดันที่ขั้วทางด้านสเตเตอร์



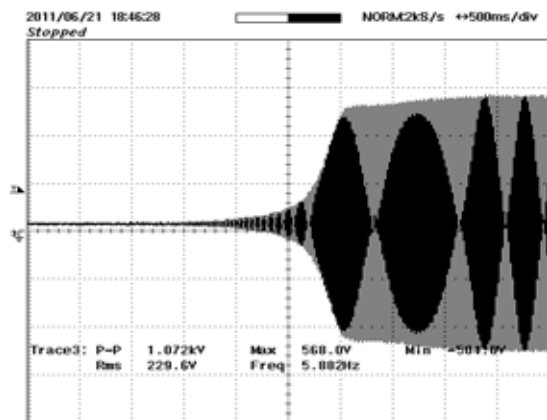
รูปที่ 7 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

บนแกน (α) เท่ากับ 358.4 โวลต์และแรงดันทางด้านสเตเตอร์บนแกน (β) มีค่าเท่ากับ 229.2 โวลต์

4.1 การกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบไร้โหลด

เมื่อจ่ายกำลังทางกลให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยต่อตัวเก็บประจุ $C_{\alpha\beta} = 50\mu F$ เข้าทางด้านสเตเตอร์ โดยที่ทางด้านโรเตอร์ใช้เวลาในการเพิ่มความเร็วจาก 0 ถึง 1460 รอบต่อนาทีในเวลา 0.4 วินาที แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้เวลา 4 วินาทีในการเข้าสู่ภาวะคงตัวโดยมีแรงดันทางด้านสเตเตอร์ที่ขดลวดช่วยจากการทดสอบเท่ากับ 358.4 โวลต์และจากการจำลองเท่ากับ 363 โวลต์ มีแรงดันผิดพลาด = 1.28% และแรงดันที่ขดลวดหลักจากการทดสอบมีค่า 229.2 โวลต์และจากการจำลอง 229.84 โวลต์ ดังนั้นจะมีแรงดันผิดพลาด = 0.28% ดังแสดงในรูปที่ (8-11)

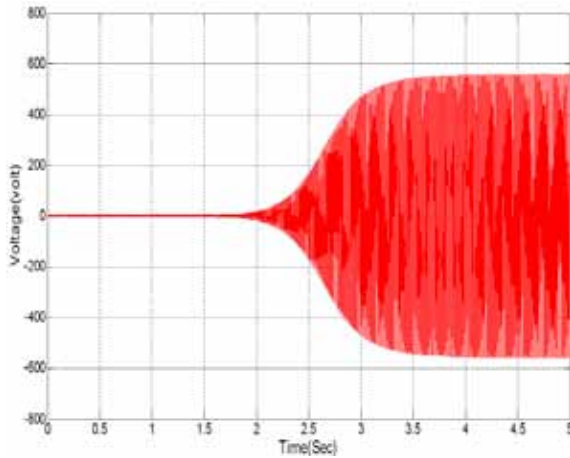
จากผลการทดสอบในสภาวะไร้โหลดในรูป (8-11) เกิดค่าความผิดพลาดของแรงดันทางด้านสเตเตอร์ของการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องทดสอบ เนื่องจากเครื่องมือวัดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไม่สามารถ



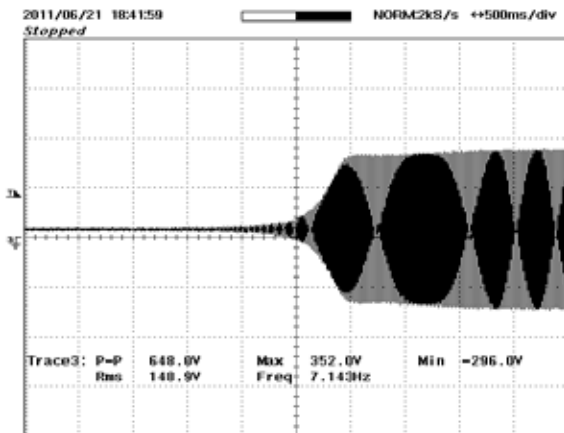
รูปที่ 8 แรงดันที่ขดลวดช่วยจากการทดสอบ ($V_{s\alpha}$)

ปรับจนให้มีค่าเท่ากับศูนย์ได้ในขณะที่ไม่มีแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดดังนั้นแรงดันที่เกิดจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดนี้จึงเสมือนมีแรงดันตกค้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำร่วมกับแรงดันทางด้านสเตเตอร์ที่เกิดจากการสร้างแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดทำให้แรงดันทางด้านสเตเตอร์ที่เกิดจากการทดสอบจริงในห้องทดสอบไม่สมมาตรกัน

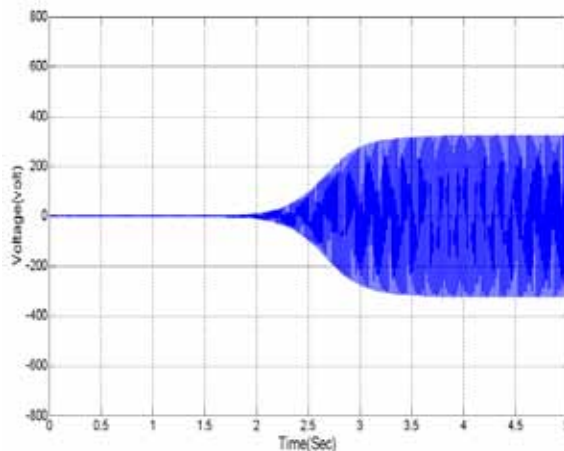
ผลการทดสอบในรูปที่ (12-17) คือการทดสอบเพื่อ



รูปที่ 9 แรงดันที่ขดลวดช่วยจากการจำลอง (V_{sa})

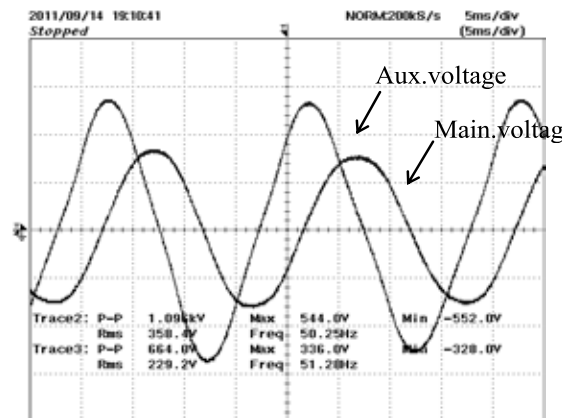


รูปที่ 10 แรงดันที่ขดลวดหลักจากการทดสอบ (V_{sb})

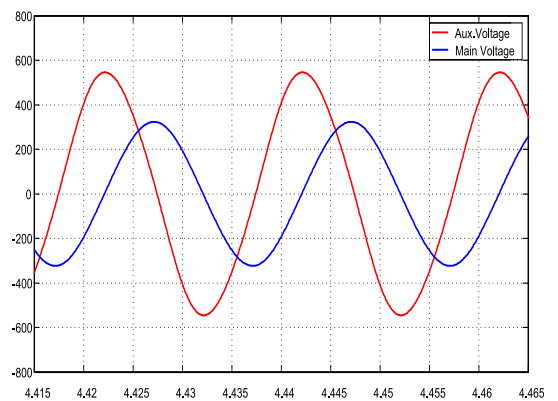


รูปที่ 11 แรงดันที่ขดลวดหลักจากการจำลอง (V_{sb})

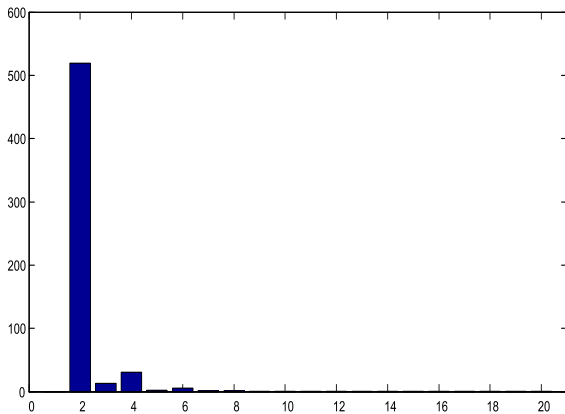
หาค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (Harmonic Voltage Distortion, THDv) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสขณะไม่มีภาระไฟฟ้าในสถานะคงตัวโดยต่อตัวเก็บประจุบนแกน $C_{\alpha\beta} = 50\mu\text{F}$ โดยผลการทดสอบมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบอยู่ระหว่าง 3.3-6.5% และมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองอยู่ระหว่าง 1.1-2.4% โดยค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบมีค่ามากกว่าการจำลองเนื่องจากการทดสอบจะมีค่าฮาร์โมนิกที่เกิดจากการพันขดลวดและสล็อตฮาร์โมนิกภายในตัวเครื่องกำเนิดซึ่งไม่ได้มีการกำหนดไว้ในกรจำลอง



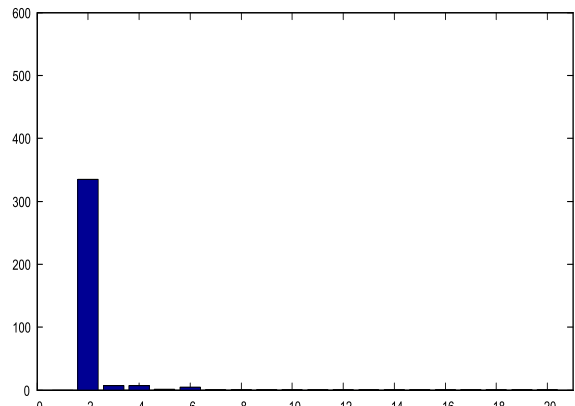
รูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วในภาวะคงตัวของแรงดันสองเฟสจากการทดสอบ



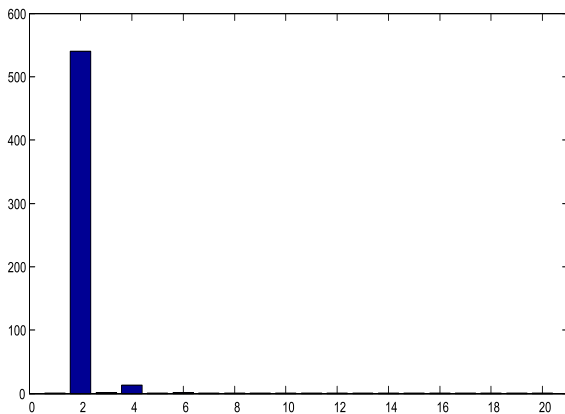
รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วในภาวะคงตัวของแรงดันสองเฟสจากการจำลอง



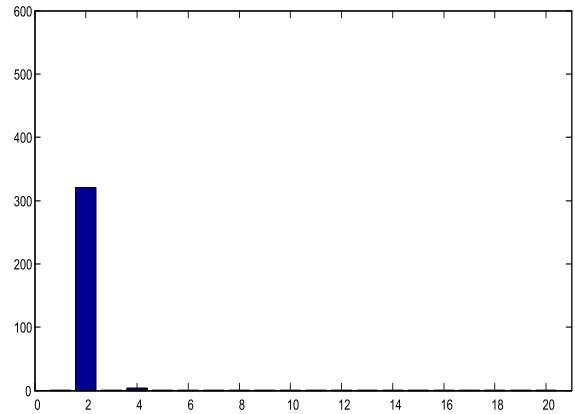
รูปที่ 14 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดช่วยจากการทดสอบ %THDv = 6.456%



รูปที่ 16 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดหลักจากการทดสอบ %THDv = 3.305%



รูปที่ 15 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดช่วยจากการจำลอง %THDv = 2.493%



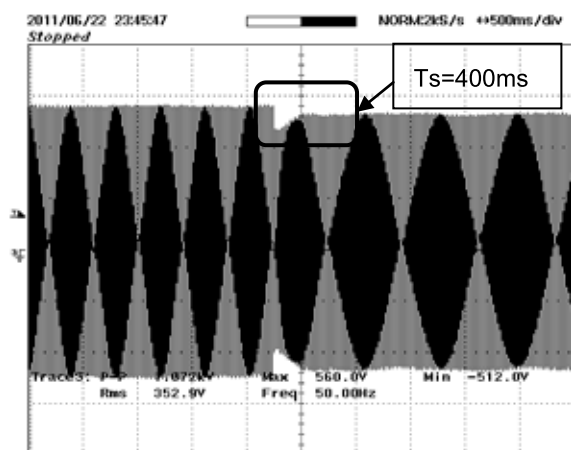
รูปที่ 17 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดหลักจากการจำลอง %THDv = 1.128%

4.2 การกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลังจากแรงดันอยู่ในสภาวะคงตัวเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง

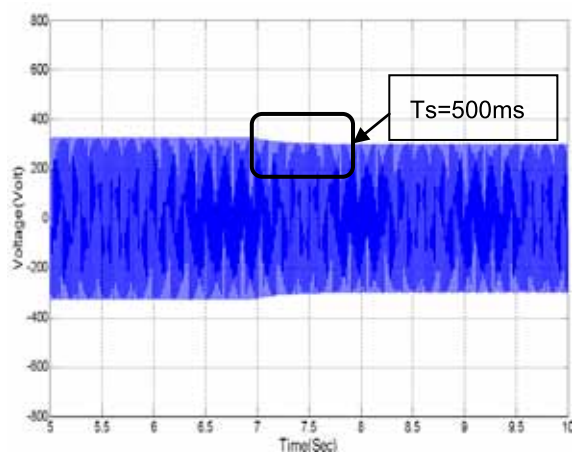
รูปที่ 18-21 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสขณะที่มีการเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใดโดยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในภาวะไร้โหลดก่อนจนถึงภาวะคงตัวและได้มีการต่อโหลดเข้าไปขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในภาวะคงตัวโดยจะมีการต่อโหลดขนาด $R_{LB} = 330\Omega$, $L_{LB} = 13mH$ ที่ขดลวดหลัก โดยจะมีการแสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแรงดันทั้ง

สองเฟสเมื่อกำหนดให้ T_s คือเวลาที่แรงดันเข้าสู่ภาวะคงตัวขณะเพิ่มโหลด

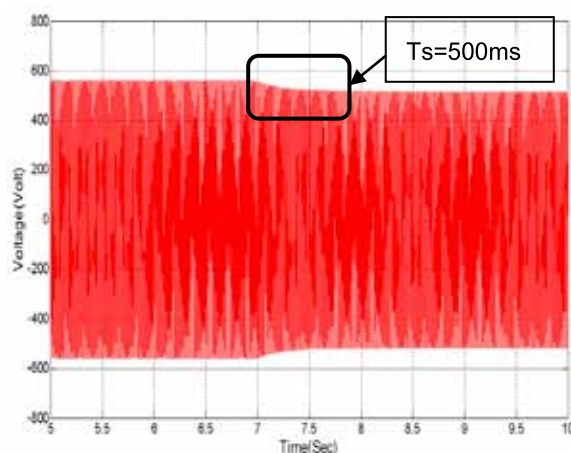
อย่างไรก็ตามผลการทดสอบจากการเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใดกับผลการจำลองมีความแตกต่างกันชั่วคราวเนื่องจากตัวต้นกำลังไม่สามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้ในขณะที่เพิ่มโหลดแต่เมื่อเข้าสู่ภาวะคงตัวพบว่าผลของแรงดันจากการทดลองกับการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันและแรงดันที่ขดลวดช่วยที่ได้จากการทดสอบมีค่าลดลง 25.83 โวลต์และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าลดลง 30.41 โวลต์และค่าแรงดันจากการทดสอบที่ขดลวดหลักมีค่าลดลง 15.23 โวลต์และจากแบบจำลองทาง



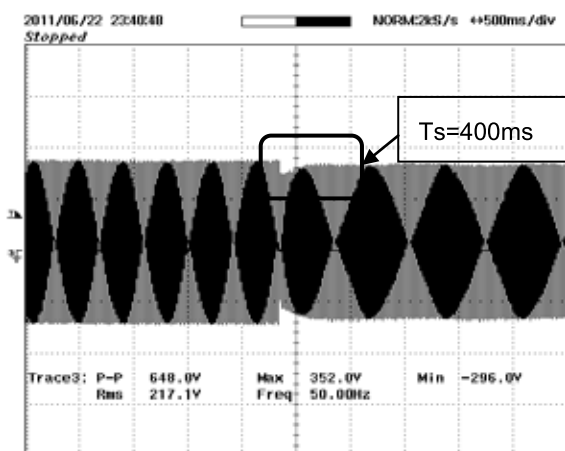
รูปที่ 18 แรงดันที่ขดลวดช่วยจากการทดสอบ (V_{sa})



รูปที่ 21 แรงดันที่ขดลวดหลักจากการจำลอง (V_{sb})



รูปที่ 19 แรงดันที่ขดลวดช่วยจากการจำลอง (V_{sa})



รูปที่ 20 แรงดันที่ขดลวดหลักจากการทดสอบ (V_{sb})

คณิตศาสตร์มีค่าลดลง 17.84 โวลต์ดังนั้นค่าความผิดพลาดของแรงดันจากการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ขดลวดช่วย 1.16% และที่ขดลวดหลัก 1.13 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

5. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสองเฟสและมีการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์กับผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องทดสอบซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องและได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจโดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นยังมีข้อด้อยในด้านแรงดันและความถี่ที่ไม่คงที่ในกรณีที่เครื่องกำเนิดทำงานขณะโหลดเปลี่ยนแปลงซึ่งในงานวิจัยต่อไปจะเสนอแนวทางการควบคุมแรงดันขาออกด้วยระบบ FC-TCR (Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor) เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้กับพลังงานลมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Eisada Ubonsai, "technical estimate of efficiency in Single-phase induction motor."
- [2] Yuttana Kumsuwan, Watcharin Sriratanavichai, and Sutichai premrideprechachain, "Analysis of

- Three-phase Self-excited Induction Generator with Matlab/Simulink,” *EECON31*, vol. II, pp 173-176, 2551.
- [3] Olorunfemi Ojoand, Obasohan Omozusi Michael Omoigui, and A.A. Jimoh, “PARAMETER ESTIMATION OF SINGLE-PHASE INDUCTION MACHINES,” *IEEE Trans.*, pp. 2280-2287, 2001.
- [4] Kh Al Jabri and A I Alolah, “Capacitance requirement for isolated self excited induction generator,” *IEE proceedings*, vol. 137, Pt. B, no. 3, March 1990.
- [5] M.Godoy Simoes and Felix A. Farret, *Renewable Energy Systems Design and Analysis with Induction Generators*, III series, 2004.
- [6] CHEE-MUN ONG, *Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink*, Book, 1997.
- [7] M.G. Simoes and F.A. Farret, *Renewable energy systems—design and analysis with induction generators*, CRC Press, 2004.
- [8] F.A. Farret and M. G. Simoes, *Integration of alternative sources of energy*, IEEE Press, 2006.
- [9] G.K. Singh, “Self-excited induction generator research – a survey,” *Electric Power Systems Research*, vol. 69, pp. 107-114, 2004.
- [10] R.C. Bansal, “Three-phase self-excited induction generators: An overview,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 292-299, 2005.
- [11] R.C. Bansal, T. S Bhatti, and D. P. Kothari, “Bibliography on the application of induction generators in nonconventional energy systems,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, no. 3, pp. 433-439, 2003.
- [12] T. Ahmed, O. Noro, E. Hiraki, and M. Nakaoka, “Terminal voltage regulation characteristics by static var compensator for a three-phase self-excited induction generator,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 978-988, 2004.
- [13] T. Ahmed, K. Nishida, K. Soushin, and M. Nakaoka, “Static VAR compensator-based voltage control implementation of single-phase self-excited induction generator,” *IEE Proc.-C*, vol. 152, no. 2, pp. 145-156, 2005.
- [14] B. Singh, S. S. Murthy, and S. Gupta, “Analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 783-790, 2004.
- [15] B. Singh and L. B. Shilpakar, “Analysis of a novel solid state voltage regulator for a self-excited induction generator,” *IEE Proc.-C*, vol. 145, no. 6, pp. 647-655, 1998.
- [16] B. Shing, S. S. Murthy, and S. Gupta, “STATCOM-based voltage regulator or self-excited induction generator feeding nonlinear loads,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 1437-1452, 2006.
- [17] S.P. Singh, B. Singh, and M. P. Jain, “Performance characteristics and optimal utilization of a cage machine as capacitor excited induction generator,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 5, no. 4, pp. 679-685, 1990.
- [18] S.N. Mahato, S. P. Singh, and M. P. Sharma, “Capacitors required for maximum power of a self-excited single-phase induction generator using a three-phase machine,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 372-381, 2008.
- [19] Y.H.A. Rahim, A. I. Alolah, and R. I. Al-Mudaiheem, “Performance of single-phase induction generators,”