

**การควบคุมเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 3 MVA
ที่ติดตั้งใบพัดเทอร์โบความเร็วลมที่มีความไม่แน่นอน
ของระบบจำลองเครื่องจักรกลโดยใช้สมการไดนามิกเชิงเส้น
A Stability Control for 3 MVA Synchronous Generator of Fixed-Speed
Wind Turbines with Fluctuations of Mechanical Model System
Using Linear Dynamic Equations**

ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

โทร.0-2321-6930-39 Fax: 0-2321-4444 E-mail: j_chamni@hotmail.com

Chamni JAIPRADIDTHAM

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Kasem Bundit University, 1761 Patanakarn Rd. Bangkok 10250 Thailand

Tel: 0-2321-6930-39 Fax: 0-2321-4444 E-mail: j_chamni@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 3 MVA ที่ติดตั้งใบพัดเทอร์โบความเร็วลมที่มีความไม่แน่นอนของระบบจำลองเครื่องจักรกล โดยใช้สมการไดนามิกเชิงเส้น ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองไดนามิกเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นลักษณะพื้นฐานของแบบจำลองไดนามิกที่สถานะสมดุลหรืออยู่ในสถานะซิงโครไนซ์ ขณะเกิดฟลัดจ์ของระบบมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดทรานเซียนต์ในสถานะคงตัว(Steady-state)ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในบทความนี้ใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้างฟลักซ์ และแรงบิดสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ ใช้การควบคุมเวกเตอร์กระแสของคอนเวอร์เตอร์ด้านเอซีเพื่อควบคุมแรงดันดีซีให้คงที่แบบแยกอิสระของกำลังแอคทีฟและกำลังรีแอคทีฟ ผลการจำลองแบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

Abstract

This paper presents the stability control of 3 MVA synchronous generators in fixed-speed wind turbines with fluctuations of mechanical model system using linear dynamic equations. In this research, a specific linear dynamic model for a synchronous machine is presented. This model is based on the balanced dynamic

model or a synchronism. The faults and network disturbances generate transients of generator in steady-state situation. This paper of the control technique uses stator flux vector controlling decomposed flux and torque component currents for rotor side converter. The current vector control of AC converter for keeping DC voltage constant, which the control of active and reactive power. The simulation results show the stability of mechanical model system.

Keywords : synchronous generator, mechanical model system, linear dynamic equations

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้พลังงานที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกำลังไฟฟ้ามีราคาแพงอีกทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเชื้อเพลิง และมีการลงทุนที่สูงพอสมควร ในบทความนี้จึงได้นำเสนอพลังงานทดแทนในอีกรูปแบบหนึ่งได้แก่พลังงานลม ซึ่งเกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายที่เพิ่มขึ้นของการผลิตกำลังไฟฟ้า และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเชื้อเพลิงเองตามธรรมชาติโดยนำมาใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบซิงโครนัสในระบบจำลองเครื่องจักรกล จะใช้สมการแบบไดนามิกเชิงเส้นเป็นพื้นฐานของการควบคุมเสถียรภาพ แบบจำลอง

ของระบบนี้ที่ติดตั้งใบพัดเทอร์โบความเร็วลมจะเป็นวงจรโครงข่ายกำลังที่มีลักษณะวงจรสมมูลเรวินิน และพิจารณาการทำงานของเครื่องจักรกลซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม โดยอาศัยหลักการควบคุมกำลังกลที่ทำให้เกิดการส่งถ่ายกำลังงานกลสูงสุดจากกังหันลมไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะคงตัว ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความไม่แน่นอนของเครื่องจักรกลกำลัง

2. หลักการ

2.1 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Generator Control by a wind turbine driven)

แบบจำลองของเครื่องจักรกลดังรูปที่ 1 เป็นระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม จะใช้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์สำหรับควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ λ_s ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดบนแกนหมุน $d-q$ จะหาความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดัน และแรงบิด ดังนี้ [4]

$$\lambda_{qs} = 0, |\lambda_s| = \lambda_{ds} = L_o I_{ms} = L_s I_{ds} + L_o I_{dr} \quad (1)$$

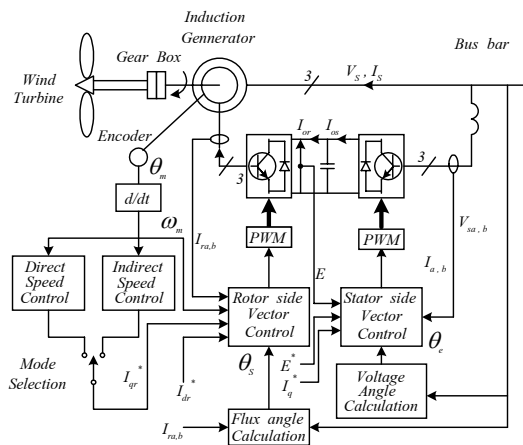
$$I_{qs} = \frac{L_o}{L_s} I_{qr}, I_{ms} = \frac{L_s}{L_o} I_{ds} + I_{dr} \quad (2)$$

$$T_s \frac{d}{dt} I_{ms} + I_{ms} = \frac{1 + \sigma_s}{R_s} V_{ds} + I_{dr} \quad (3)$$

$$T_e = K_{pow} \frac{P}{2} L_m I_{qr} I_{ms} \quad (4)$$

โดย

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, \sigma_s = \frac{L_s - L_o}{L_o}, K_{pow} = 3/2$$



รูปที่ 1 ระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม

จากสมการที่ (2) และ (4) จะเห็นได้ว่าแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส I_{qr} เมื่อค่าคงที่ $I_{ms} \cong V_{ds} / \omega_e L_o$

และความถี่ของแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าคงที่เปรียบเสมือนมีค่ากระแสอาร์เมเจอร์ และมีกระแสฟลักซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกอิสระคือกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ I_{ds} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ I_{dr} ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกำลังรีแอคทีฟและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ เมื่อทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดทำการปรับกระแส I_{dr}^* ให้เท่ากับศูนย์ เพื่อลดการสูญเสียที่คอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor side converter) และใช้กระแสสร้างแรงบิด I_{qr}^* สำหรับควบคุมความเร็วของกังหันลม

2.2 แบบจำลองไดนามิกกังหันลมที่มีความไม่แน่นอนของระบบเครื่องจักรกล (Dynamic Model of the Wind Turbine with Fluctuations of Mechanical System)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจำลองแบบได้ในลักษณะเป็นแหล่งจ่ายวงจรสมมูลเรวินิน E' ที่อยู่ในรูปอิมพีแดนซ์ $R_s + jX'$ ซึ่งต่อร่วมกับวงจรโครงข่ายเพื่อชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 [1] แบบจำลองไดนามิกนี้จะนิยามค่ากระแสและแรงดันในขดลวดขั้วขึ้นใหม่ เพื่อให้สมการที่ใช้อยู่ในรูปที่สมมาตรกัน ในขณะที่เกิดผลกระทบทางไดนามิกของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ ค่า E' สามารถคำนวณโดยการอินทิเกรตดังนี้

$$\frac{dE'}{dt} = -j\omega_s E' - \frac{1}{T_o'} (E' - j(X_o - X')I_s) \quad (5)$$

เมื่อ

$$T_o', X' \text{ และ } X_o \text{ คือ ค่าคงที่}$$

$$T_o' = \frac{X_r + X_m}{2\pi f_s R_s}, X_o = X_r + X_m, X' = X_s + \frac{X_r X_m}{X_r + X_m}$$

โดย

- X_r คือ ค่ารีแอคแตนซ์การรั่วไหลทางด้านโรเตอร์
- X_s คือ ค่ารีแอคแตนซ์การรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
- X_m คือ ค่ารีแอคแตนซ์แมกนีไทด์ (Magnetizing)
- R_s คือ ค่าความต้านทานสเตเตอร์
- R_r คือ ค่าความต้านทานโรเตอร์
- f_s คือ ความถี่วงจรโครงข่าย
- I_s คือ กระแสสเตเตอร์
- ω_s คือ ความเร็วเชิงโคโรนัสเชิงมุม (rad/s)

หาค่ากระแสสเตเตอร์ได้จากสมการที่ (6) ดังนี้

$$I_s = \frac{U - E'}{R_s + jX'} \quad (6)$$

หาสมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังนี้

$$-\frac{P_m}{1-s} + P_e = -2H \frac{d_s}{dt} \quad (7)$$

$$P_m - P_e = 2H(1-s) \frac{d_s}{dt} \quad (8)$$

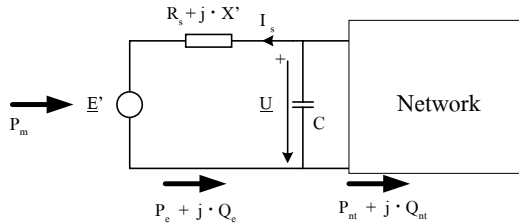
โดย

U คือ แรงดันสเตเตอร์ (V)

P_m คือ ค่ากำลังงานกลของกังหันลม (p.u.)

P_e คือ ค่ากำลังทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)

H คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (s)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลแบบจำลองไดนามิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากสมการที่ (6) ค่ากระแสสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถหาได้ในรูปฟูเรียร์อนุกรม และขนาดคลื่นไซน์เป็นลักษณะคลื่นมอดูเลชันและคลื่นฮอสซิเลชันจะขึ้นอยู่กับตัวแปร ω_s เมื่อกังหันลมติดตั้งร่วมกับระบบจำลองเครื่องจักรกลด้วยวงจรมูลเหตุวินดังรูปที่ 2 ดังนั้นตัวแปรจะถูกกำหนดด้วยคลื่นไซน์ความถี่ไม่แน่นอนของระบบเครื่องจักรกล เช่น ΔP_m , p_e , I_s และ E' และสมการทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทางไดนามิกนั้น จะขึ้นอยู่กับแต่ละตัวแปรอินพุต เช่น ขนาดคลื่นไซน์ความถี่ไม่แน่นอนของเครื่องจักรกล P_s ความถี่คลื่นไซน์ความถี่ไม่แน่นอนของเครื่องจักรกล กำลังไฟฟ้าลัดวงจร S_{cc} และอัตราส่วน X/R เป็นต้น

2.3 สมการไดนามิกเชิงเส้นของระบบจำลอง

(Linear Dynamic Equations of Model System)

พิจารณาจากรูปที่ 3 วงจรสมมูลแบบจำลอง RX ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ในสภาวะคงตัวของระบบค่ากำลังงานกลของกังหันลม ΔP_m สามารถหาได้จากการแปลงฟูเรียร์ที่อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นอนุพันธ์อันดับที่ 1 ดังนี้ [2-3]

$$X(\omega) = (j\omega I - A')^{-1} b \Delta P'_m(\omega) \quad (9)$$

จากสมการที่(9) สามารถเขียนสมการใหม่ดังนี้

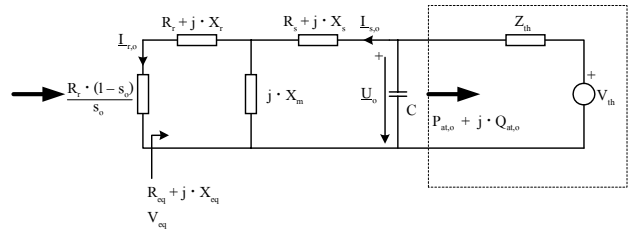
$$\begin{pmatrix} \Delta E'_{r,r} + j\Delta E'_{r,m} \\ \Delta E'_{m,r} + j\Delta E'_{m,m} \\ \Delta s_r + j\Delta s_m \end{pmatrix} = (j\omega I - A')^{-1} b P_s \quad (10)$$

จากสมการที่(10) สามารถหาค่าตัวแปรของคลื่นไซน์ที่ไม่แน่นอนดังนี้

$$\Delta E'_r = \Delta E'_{r,r} \sin(\omega t) + \Delta E'_{r,m} \cos(\omega t) \quad (11)$$

$$\Delta E'_m = \Delta E'_{m,r} \sin(\omega t) + \Delta E'_{m,m} \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$\Delta s = \Delta s_r \sin(\omega t) + \Delta s_m \cos(\omega t) \quad (13)$$



รูปที่ 3 วงจรสมมูลแบบจำลอง RX ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

หาค่ากำลังงานทางกลและกระแสโรเตอร์ของแบบจำลอง RX จากสมการที่(14)และ(15) ดังนี้

$$P_{m,0} = (I_{r,0})^2 \frac{R_r(1-s_0)}{s_0} \quad (14)$$

$$I_{r,0} = \frac{V_{eq}^2}{X_{eq}^2 + \left(R_{eq} + \frac{R_r(1-s_0)}{s_0} \right)^2} \quad (15)$$

2.4 ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านแหล่งจ่าย

(Front-end Converter Control Strategy)

หน้าที่หลักของคอนเวอร์เตอร์ด้านแหล่งจ่ายคือการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ โดยไม่คำนึงถึงขนาดและทิศทางของไหลของกำลังสลิป(Slip Power) แต่จะใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแส ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระ(Decoupling Control)ของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระหว่างคอนเวอร์เตอร์ และแหล่งจ่ายบนแกนหมุน $d-q$ กำหนดได้จากสมการดังนี้ [4]

$$P = K_{pow} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (16)$$

$$Q = K_{pow} (V_d I_q - V_q I_d) \quad (17)$$

ถ้ากำหนดให้แกนหมุนซึ่งแกนนอน (d-axis) ชี้นในแนวเดียวกันกับซัพพลายโวลเตจเวกเตอร์ และ $V_q = 0$ ขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายบนแกนหมุน $d-q$ จะมีค่าคงที่และ V_q จะมีค่าคงที่ด้วย จากสมการที่(16) และ(17)ค่า P และ Q จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส I_d และ I_q ดังนั้นจะได้ว่ากระแส I_d เป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟที่สามารถใช้ในการรักษา E ให้มีค่าคงที่ และกระแส I_q เป็นส่วนประกอบของกำลังรีแอคทีฟ Q สามารถใช้ในการควบคุมขนาดและทิศทางของ Q ได้

3. ผลการจำลองของระบบ

ระบบนี้จำลองแบบจากรูปที่ 1 และ 3 จะพิจารณาจากองค์ประกอบในสภาวะการทำงานคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่มีขนาดฟักัด 3 MVA 6 ขั้วแบบจำลองของระบบอาศัยการทำงานของโปรแกรม

MATLAB version 5.2 ด้วยการใช้ระบบ Simulink โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

Synchronous Generator : 380 V 2.1 A 1390 rpm 50 Hz

$P_s = 0.1$ p.u. , $P_m = 1$ p.u. , $S_{cc} = 7$ MVA และ $X/R = 5$

Stator winding star connected (Y) : $C = 25$ μ F

$R_s = 10$ Ω $R_r = 6.3$ Ω $L_{Os} = 43$ mH $L_{Or} = 40$ mH

Wind Turbine : $X_r = 0.0639$ p.u. , $X_s = 0.1878$ p.u.

$X_m = 2.78$ p.u. , $R_s = 0.00571$ p.u. , $R_r = 0.00612$ p.u.

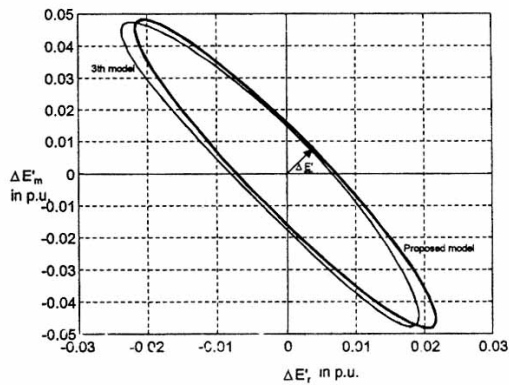
$H = 3.025$ s , $C = 1.1475 \times 10^{-3}$ p.u. , $\omega_s = 100\pi$ rad/s

Base voltage = 660 V , Base power = 350 kvar , $V_{th} = 1$ p.u.

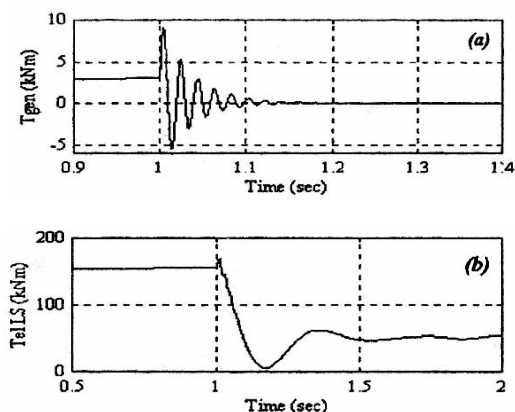
$r = 3.24$ m , $J = 7.5$ kg- m^2 , $B = 0.06$ Nm/rad

$v_{max} = 12$ m/s , $v_{min} = 4$ m/s , $G = 5.065$, $\rho = 1.299$

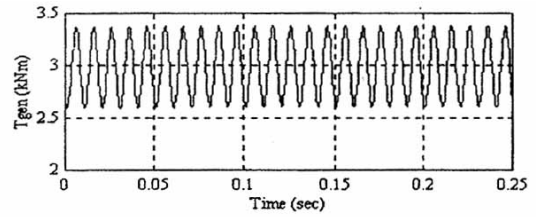
Torque observer : $k_{01} = 0.98$, $k_{02} = 5.9$



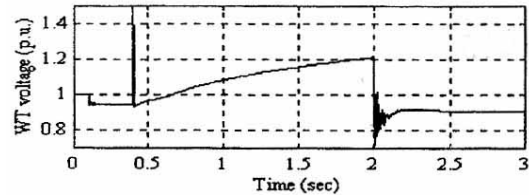
รูปที่ 4 ผลเปรียบเทียบของแรงดันที่มีความไม่แน่นอนระหว่างแบบจำลองไดนามิกอันดับที่ 3 กับไดนามิกเชิงเส้น



รูปที่ 5 (a) ผลแรงบิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (b) ผลแรงบิดความเร็วของกังหันลมต่ำเทียบกับโดเมนเวลาในสภาวะคงตัว



รูปที่ 6 ผลจำลองระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมที่มีแรงบิดภายใต้แรงดันระบบไม่สมดุล



รูปที่ 7 ผลควบคุมแรงดันคงที่แบบแยกอิสระในสภาวะคงตัว

4. บทสรุป

จากผลการจำลองรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส เป็นผลการเปรียบเทียบเชิงตัวเลขระหว่างแบบจำลองไดนามิกอันดับที่ 3 กับแบบจำลองไดนามิกเชิงเส้น จะให้ค่า $\Delta E'_{r,r} = 0.0032$ p.u. , $\Delta E'_{m,r} = -0.0227$ p.u. และ $\Delta E'_{s,r} = 0.0023$ p.u. ดังนั้นระบบควบคุมสามารถทำงานได้จริงค่าแรงดันมีความเหมาะสมที่จะป้อนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจะได้ขนาดโรเตอร์ฟลักซ์และความเร็วรอบตามต้องการ สภาวะคงตัวกังหันลม(Wind Turbines :WT)จะทำงานที่ความเร็วพัดลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้สามารถทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าและสูงกว่าความเร็วเชิงโรนัส และผลจากรูปที่ 6 การนำ WT มาใช้งานภายใต้แรงดันระบบแบบไม่สมดุล จะทำให้องค์ประกอบของแรงบิดมีการออสซิลเลตตั้งคั้งตัว โดยความถี่ของกระแสสลับและกระแสของคอนเวอร์เตอร์มีค่าคงที่เท่ากับค่าของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Feijoo, J.Cidras, and J. L.G. Dornelas, "Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power system," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.14, pp. 1582-1588, Dec. 1999.
- [2] D.S. Brereton, D. G. Lewis, and C.C. Young " Representation of induction motor loads during power system stability studies" *Trans. AIEE*, vol. 76, pp.451-461, Aug. 1957.
- [3] Z. Saad-Saoud and N. Jenkins, " Models for predicting flicker induced by large wind turbines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.14, pp.743-748, Sept. 1999.
- [4] P.Chatpan and V. Kinnarees " Vector control strategies for a doubly-fed induction generator driven by a wind turbine", *EECON-24*, pp.223-228, 22-23 Nov. 2001.

