

ความเค้นทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดกระตุ้น 2 ทิศทาง  
ที่ติดตั้งใบพัดเทอร์ไบน์ที่มีความเร็วลมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ  
ในระบบเครื่องจักรกล

Mechanical Stresses of a Doubly-fed 3 phase Induction Generator  
of Fixed-Speed Wind Turbines for Stability Enhancement  
in Mechanical System

ชัชชัย อุทัยวศิน<sup>1</sup> และ ชำนิ ใจประดิษฐ์ธรรม<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถ.เพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถ.พัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

\*E-mail : j\_chamni@hotmail.com โทร. 02-3216930-9 , โทรสาร 02-3214444

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการหาความเค้นทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดกระตุ้น 2 ทิศทางที่ติดตั้งใบพัดเทอร์ไบน์ความเร็วลมสำหรับเพิ่มเสถียรภาพระบบเครื่องจักรกลไดนามิกเชิงเส้น ขณะเกิดฟอลต์ที่มีสัญญาณรบกวนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และมีผลเกิดความเค้นของระบบเครื่องจักรกลใบพัดเทอร์ไบน์ลม(Wind Turbine:WT) บทความวิจัยนี้หาผลเกิดฟอลต์และสิ่งรบกวนในระบบจำหน่ายแรงดัน ลักษณะที่ติดตั้งใบพัดเทอร์ไบน์ที่มีความเร็วลมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การปรับปรุงความเร็วลมเทอร์ไบน์ให้มีความเร็วคงที่แล้วเกิดคุณลักษณะไดนามิก ผลการจำลองระบบที่ได้จะเกิดทรานเซียนต์แรงบิดหาค่าความเค้นทางกลแนวซับเคลื่อนจะลดลง และกำลังจ่ายออกมีความไม่แน่นอนเทียบกับความเร็วคงที่ของการใช้ใบพัดเทอร์ไบน์ลม

**คำหลัก:** ใบพัดเทอร์ไบน์ ความเค้นทางกล เครื่องจักรกลไดนามิกเชิงเส้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### Abstract

This paper presents the mechanical stresses of a doubly fed 3 phase induction generators in fixed-speed wind turbines for linear dynamic mechanical system stability enhancement. The faults and disturbances generate transients of the generator electromagnetic torque which result in significant stresses for the WT mechanical system. In this paper, the effect of faults and other disturbances in rural voltage distribution system, the most important advantage of the variable speed WT the conventional constant speed (CS) machines are the improved dynamic characteristics. The simulation results show the torque transient are a great reduction of the mechanical stresses and output power fluctuation can be achieved compared to the CS mode of operation of the WT.

**Keywords:** wind turbines, mechanical stresses, linear dynamic mechanical, induction generators

### 1. บทนำ

องค์ประกอบพื้นฐานการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ภายนอกเครื่องต้นกำลังและเครื่องกระตุ้น ไบพัตเทอร์ไบน์ลม (WT) จะติดส่วนท้ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลต่อค่ากระแสเกินและแรงดันเกินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยทั่วไป WT ทำให้เกิดผลกระทบเชิงย่นในขณะเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแรงบิด (Torque) ตามทิศทางการหมุน แรงบิดนี้จะมีขนาดเท่ากันและต้านทานกับแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กของโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งระบบเครื่องจักรกลจะติดตั้งไบพัตเทอร์ไบน์กังหันลมคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิด วาวด์โรเตอร์ (wound rotor) แบบกระตุ้น 2 ทิศทางได้ถูกนำไปใช้งานร่วมกับวงจรควบคุมเวกเตอร์กระแสของคอนเวอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source converter; VSC) วัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อการจำลองระบบเครื่องจักรกลและสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีภาระกระตุ้นความเฉื่อย โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนที่สามารถควบคุมกำลังสลิปเพื่อหาความเค้นทางกลด้วยเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น WT จะต้องออกแบบให้มีความคงทนต่อการเกิดฟอลต์ ผลการจำลองระบบที่ได้จะเกิดทรานเซียนต์แรงบิดหาค่าความเค้นทางกลแนวขับเคลื่อนจะลดลง จะเพิ่มเสถียรภาพของระบบให้มีความสามารถทำงานอยู่ได้อย่างสมดุลหรือยังคงอยู่ในสภาวะซิงโครไนซ์ (Synchronism)

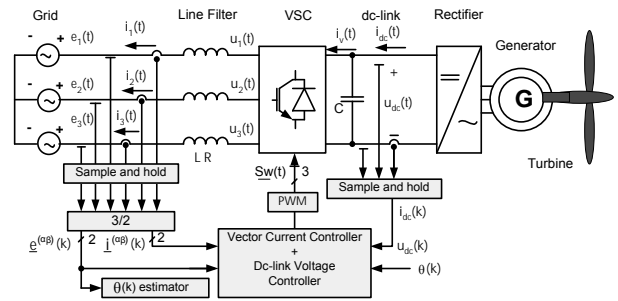
### 2. หลักการ

#### 2.1 ผลของแรงดันลดลงด้วยตัวควบคุมกระแส

แรงดันตกจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาระหว่างครึ่งไซเคิลถึง 1 นาที โดยทั่วไปแล้วเกิดจากฟอลต์ลัดวงจรในระบบโหลด จะถูกจ่ายด้วยฟอลต์ฟีลเดอร์ (fault feeder) ที่มีแรงดันตก[1] ขนาดแรงดันจะลดลงในระบบ

เนื่องจาก 3 เฟสฟอลต์ ซึ่งจะแสดงไดอะแกรมเชิงเส้นดังรูปที่ 1 ที่นำไปใช้ในการจำลองระบบ ดังนั้นการหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย  $Z_s$  ขณะเกิดฟอลต์ที่ฟีลเดอร์จะถูกต่อเชื่อมกับบัสเช่นเดียวกับไบพัตเทอร์ไบน์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างฟอลต์กับจุดเชื่อมต่อร่วมด้วยไบพัตเทอร์ไบน์ความเร็วลมของระบบรูปที่ 2 ในบัส 1 คือ  $Z_F$  สามารถหาแรงดันที่บัส 1 จากสมการที่(1) ดังนี้

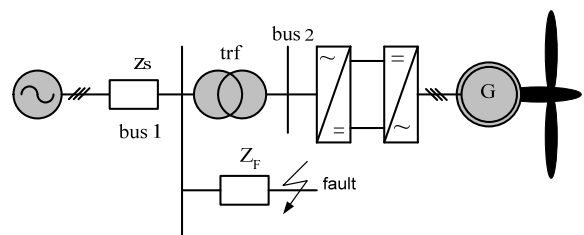
$$u_{dip} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_s} \tag{1}$$



รูปที่ 1 ระบบควบคุมของเครื่องจักรกลไดนามิกเชิงเส้นที่มีการใช้ VSC โดยให้ไบพัตกังหันลมขับเคลื่อน

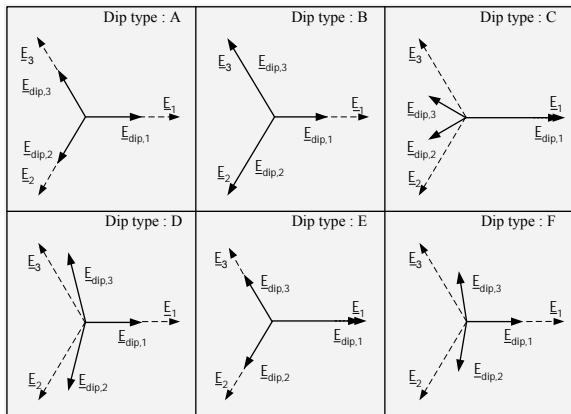
สมมติให้มีแรงดันขณะเกิดฟอลต์มีค่าเท่ากับ 1 pu. ถ้าอัตราส่วน  $X/R$  ของอิมพีแดนซ์  $Z_F$  กับ  $Z_s$  มีความแตกต่างกัน เฟสของค่าแรงดันจะแปรผันตามค่ามุมเฟสจัมป์ (phase-angle jump) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$\arg(u_{dip}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_F + X_s}{R_F + R_s}\right) \tag{2}$$



รูปที่ 2 ระบบจำลองเครื่องจักรกลไดอะแกรมเชิงเส้น

กรณีที่เกิดฟอลต์ไม่สมดุลที่ตำแหน่งเดียวกันในการคำนวณหาแรงดันที่ไบพาทเทอร์โบน จะยุ่งยากพอสมควร ดังนั้นผลของแรงดันลดลงที่ได้ในบัส 1 นั้น จึงสามารถจำแนกได้ 6 ชนิดดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1 แสดงค่าของแรงดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วโดยใช้ VSC ที่บัส 1 และบัส 2 ในขณะที่เกิดฟอลต์ในระบบจำลองรูปที่ 2



รูปที่ 3 จำแนกชนิดเฟสเซอร์ A – F ของค่าแรงดันลดลง 3 เฟสก่อนและขณะเกิดฟอลต์ในระบบ

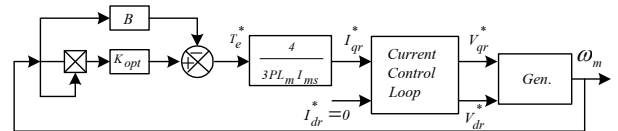
ตารางที่ 1 จำแนกชนิดค่าแรงดันลดลงที่บัสต่างๆ ขณะเกิดฟอลต์ในระบบของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อแบบ Δ/Y

ชนิดฟอลต์	แรงดันลดลงที่บัส 1	แรงดันลดลงที่บัส 2
3 phase fault	ชนิด A	ชนิด A
1 phase fault	ชนิด B	ชนิด C
2 phase to ground fault	ชนิด E	ชนิด F
phase-to-phase	ชนิด C	ชนิด D

## 2.2 ระบบควบคุมความเร็วของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดรูปที่ 1 จะให้กำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) ที่ความเร็วค่าหนึ่งเรียกว่า ความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed) ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุมความเร็ว

ของกังหันลมให้ได้ความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed Tracking) คงที่ตลอด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมแสดงดังรูปที่ 4 การควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ให้ได้ความเร็วออปติ멈ในสภาวะชั่วคราว



รูปที่ 4 ระบบควบคุมความเร็วของกังหันลม

## 2.3 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด

### กระตุ้น 2 ทิศทาง

กรณีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) ที่มีลักษณะการกระตุ้น 2 ทิศทาง (Doubly fed Induction Generator) จะใช้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ เพื่อสำหรับควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์  $\lambda_s$  ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระในระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดบนแกนหมุน ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดัน, ฟลักซ์และแรงบิดได้จากสมการที่ (3) และ (7) ดังนี้

$$I_{qs} = \frac{L_o}{L_s} I_{qr} \quad , \quad I_{ms} = \frac{L_s}{L_o} I_{ds} + I_{dr} \quad (3)$$

$$|\lambda_s| = \lambda_{ds} = L_o I_{ms} = L_s I_{ds} + L_o I_{dr} \quad (4)$$

$$T_s \frac{d}{dt} I_{ms} + I_{ms} = \frac{I + \sigma_s}{R_s} V_{ds} + I_{dr} \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_{ms} = \frac{I}{T_s I_{ms}} \left[ \frac{I + \sigma_s}{R_s} V_{qs} + I_{qr} \right] \quad (6)$$

$$T_e = K_{pow} \frac{P}{2} L_m I_{qr} I_{ms} \quad (7)$$

โดย

$$K_{pow} = 3/2 \quad , \quad T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

จากสมการที่(3)และ(7)นี้ จะเห็นว่าค่าแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส  $I_{qr}$  เมื่อขนาดและความถี่ของแรงดันที่แหล่งจ่ายมีค่าคงที่เปรียบเสมือนมีกระแสอาร์เมเจอร์ [1] และกระแสฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกอิสระคือกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์  $I_{ds}$  และกระแสสร้างฟลักซ์ด้านโรเตอร์  $I_{dr}$  ดังนั้นลดการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor side converter) และใช้กระแสสร้างแรงบิด  $I_{qr}$  สำหรับควบคุมความเร็วของกังหันลม

### 2.4 กำลังงานกลของกังหันกังหันลมในระบบจำลอง

ถ้าสมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีลักษณะการทำงานขณะเริ่มต้นในสถานะคงที่แล้ว การจำลองแบบเครื่องจักรกลไดนามิกเชิงเส้นที่มีการติดใบพัดเทอร์ไบน์ลม ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังงานกลของกังหันลมในระบบได้จากสมการที่(8)และ(9) ได้ดังนี้

$$P_m(t) = P_{m,o} + \Delta P_m \quad (8)$$

และ

$$P_m - P_e = 2H(1-s) \frac{ds}{dt} \quad (9)$$

โดย

$P_{m,o}$  คือ ค่ากำลังงานเฉลี่ยของใบพัดเทอร์ไบน์ (pu)

$\Delta P_m$  คือ ค่ากำลังงานกลด้วยการหมุนรอบ (pu)

$P_m$  คือ ค่ากำลังงานกลของกังหันลม (pu)

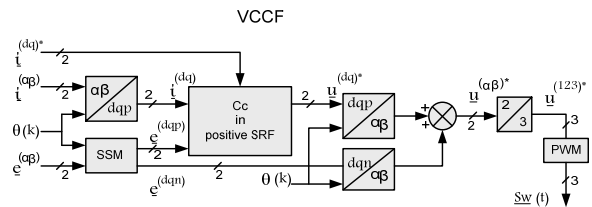
$P_e$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(pu)

$H$  คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(S)

### 2.5 การปรับปรุงสัญญาณรบกวนแรงดันของระบบด้วยตัวควบคุมกระแส

การปรับปรุงสัญญาณรบกวนแรงดันที่มีสมรรถนะภายใต้เงื่อนไขของความไม่สมดุล พิจารณาจากรูปที่ 5 จะใช้ตัวควบคุมกระแส CC ในภาค SRF ด้านบวก และมีองค์ประกอบเป็นซีเควนซ์ด้านลบของเวกเตอร์แรงดันส่วนภาคจำแนกซีเควนซ์ SSM นั้น จะทำการตรวจหาค่าแสดงผลด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซีลิงค์ ทำให้เกิดสถานะคงที่ด้วยระบบควบคุมในภาค VCCF



รูปที่ 5 บล็อกระบบควบคุมเวกเตอร์ค่ากระแสย้อนกลับในภาค VCCF

พิจารณาจากรูปที่ 5 ตัวควบคุมกระแส CC จะมี 2 ส่วนที่ทำงานด้านบวกและด้านลบในภาค SRF ร่วมกัน กระแสและแรงดันจะจำแนกออกด้วยภาค SSM ซึ่งแสดงผลของแรงดันกระแสเพื่อ ดังนั้นตัวควบคุมนี้สามารถตรวจผลหาความถูกต้องของแรงดันที่ลดลงได้เพื่อปรับปรุงสัญญาณรบกวน ส่วนค่าแรงดันจะเริ่มลดลงที่ 30 ms แรงดันดีซีลิงค์สัญญาณรบกวนจะเกิดการแกว่งไปมาเพราะว่าระบบไม่เสถียรภาพ [1]

### 3. ผลการจำลองระบบ

ระบบจำลองเครื่องจักรกลรูปที่ 1 และ 2 พิจารณาจากองค์ประกอบพล็อต และสถานะการทำงานช่วงเกิดผิดปกติขึ้นในวงจรระบบควบคุมของเครื่องจักรกลไดนามิกเชิงเส้นที่มีการใช้ VSC โดยมีใบพัดกังหันลมขับเคลื่อนแบบจำลองของระบบอาศัยการทำงานของโปรแกรม MATLAB version 5.2 ด้วยการ Simulink ของระบบเครื่องจักรกล โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

Induction Motor : 380 V, 19 A , 6 pole ,10 HP,  
 $L_o = 191.8$  mH,  $L_r = 234$  mH ,  $L_s = 206.5$  mH ,  
 $R_s = 1.06 \Omega$ ,  $R_r = 2.312 \Omega$

**Converter** : C = 2400  $\mu$ F, E = 550 V ,  $I_q = 0$  A ,

$R = 0.1 \Omega$  L = 24 mH ,Supply Voltage = 250 V

**VCC System** :

- Current controller: ค่าพารามิเตอร์  $k_p = 3.7$

(deadbeat) ,  $k_i = 23 \times 10^{-3}$

- Dc-link Voltage controller: ค่าพารามิเตอร์  $k_{FF} =$

0.81,  $k_{p,dc} = 0.55$

**DVCC System** :

- Current controller: ค่าพารามิเตอร์  $k_p = 2.6$

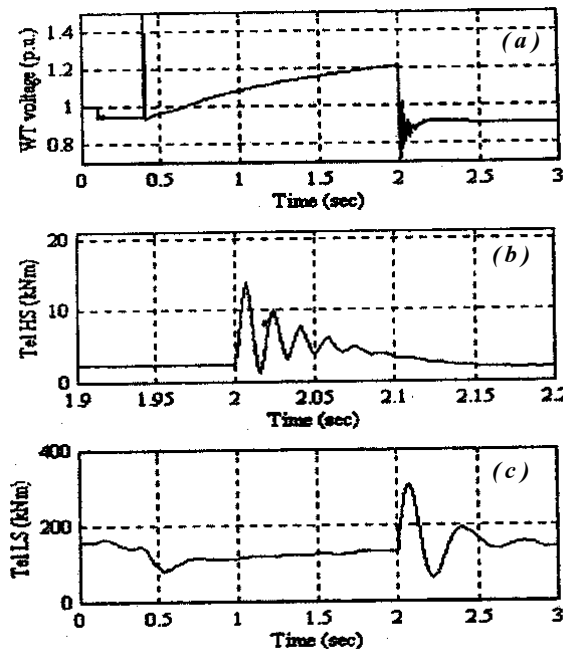
(70%deadbeat),  $k_i = 16 \times 10^{-3}$

- Dc-link Voltage controller :ค่าพารามิเตอร์  $k_{FF} =$

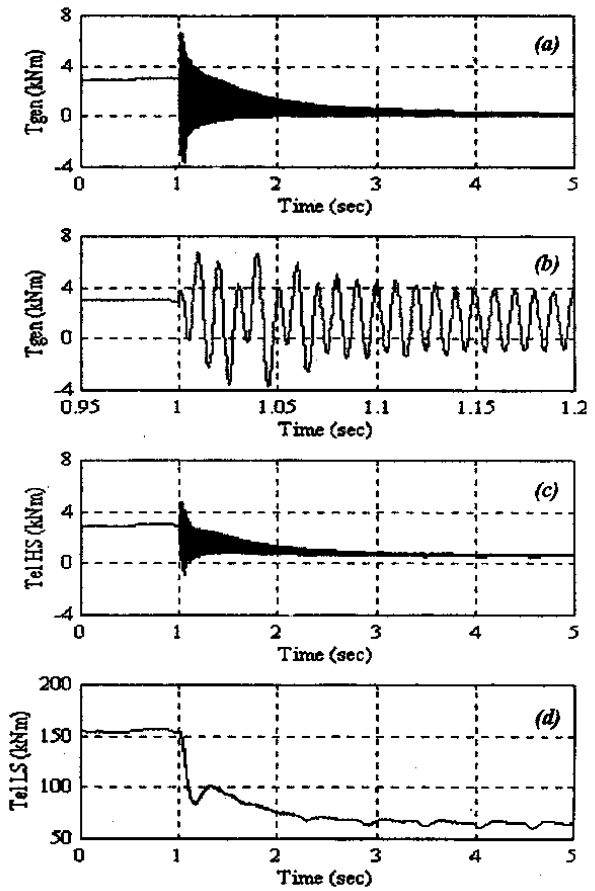
0.81,  $k_{p,dc} = 0.17$

**Wind Turbine** :  $r = 3.24$  m ,  $J = 75$  kgm<sup>2</sup> ,

$B = 0.06$  Nm/rad ,  $v_{max} = 12$  m/s ,  $v_{min} = 4$  m/s



รูปที่ 6 ผลรีโครสซิง(Reclosing)ของระบบที่CBเกิดฟลัดต์ (a) แรงดันGenerator (b) แรงบิดความเร็วสูง (c) แรงบิดความเร็วต่ำ



รูปที่ 7 ผลเกิดฟลัดต์ที่หม้อแปลงไฟฟ้า(a)และ(b) แรงบิด Generator (c) แรงบิดความเร็วสูง (d)แรงบิดความเร็วต่ำ

#### 4. บทสรุป

ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพการทำงานของระบบ ค่าความเค้นในแนวข้อเคลื่อนWTจะวิเคราะห์จากการรบกวนของระบบ การทำงานของรีโครสซิงทำให้เกิดฟลัดต์ไม่สมมาตรและฟลัดต์สมมาตรที่มีความเร็วคงที่ WT ในสถานะคงตัวกึ่งหันลมจะทำงานที่ความเร็วออฟติมัมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้สามารถทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าและสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส การเกิดรีโครสซิงของเซอร์กิตเบรกเกอร์(CB)ที่ใกล้กับWTจะเกิดแรงบิดขึ้นด้วย

#### 5. เอกสารอ้างอิง

[1] E.Levi.(1995). A unified approach to main flux in D-Q axis models of induction machines," IEEE Trans. Energy Conversion,vol.10, no.3,September.