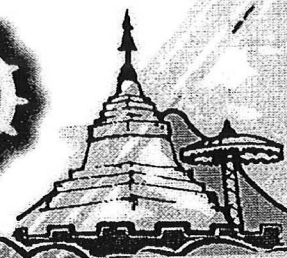


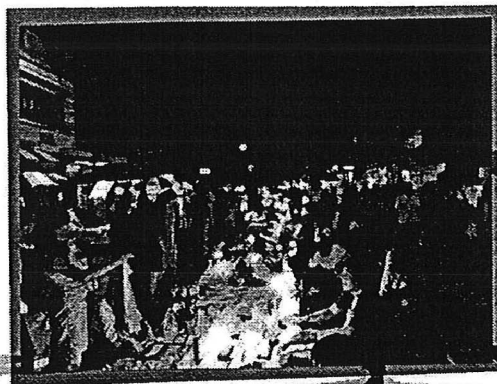
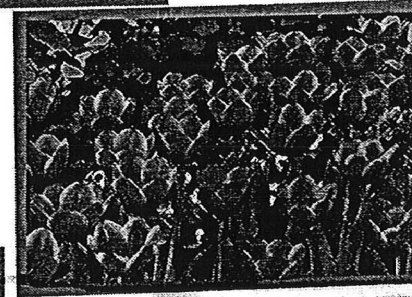
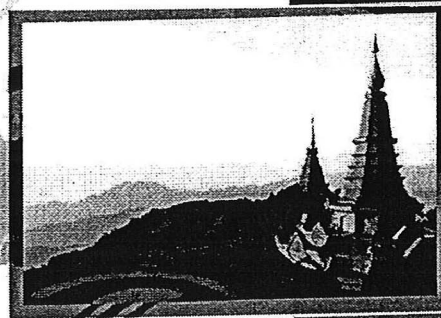
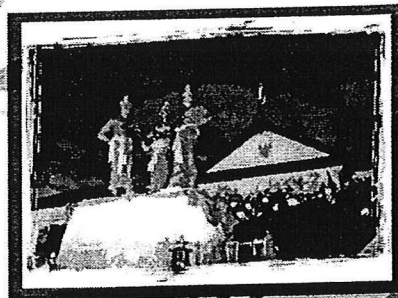
บทความวิจัย

EENET 2010

- Chiangmai Thailand -



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2

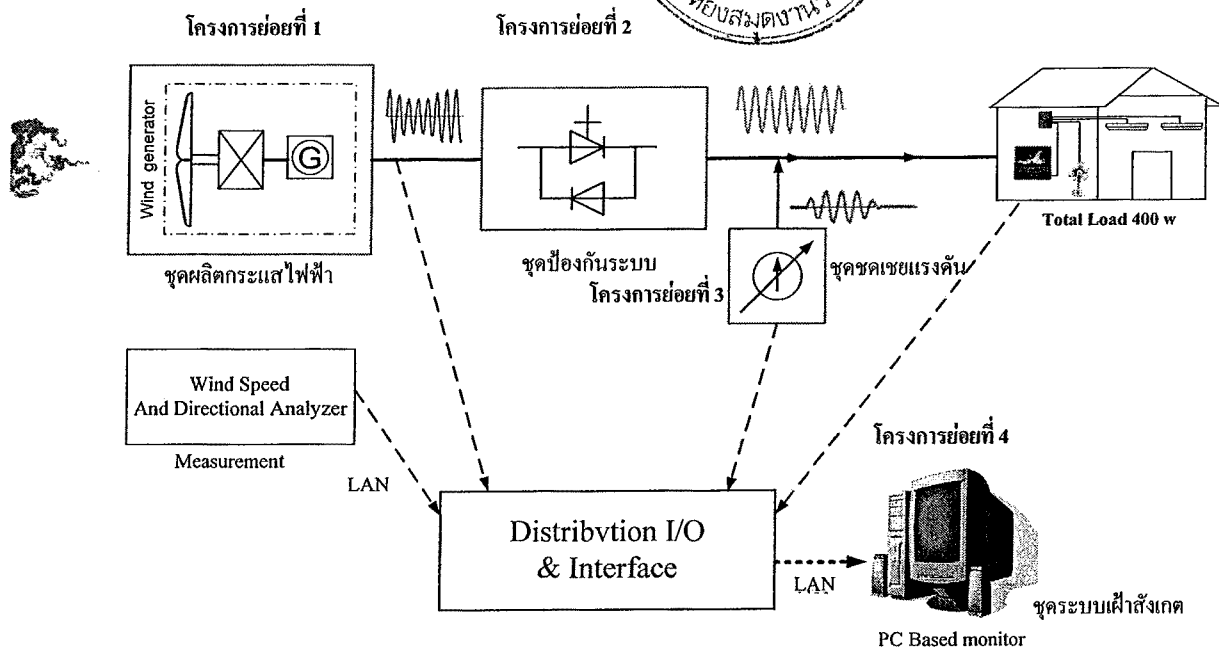


EENET
2010
CHIANGMAI

5-6 กุมภาพันธ์ 2553 ในอาคารหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่

รายละเอียดการจัด Work shop



รูปที่ 1. ระบบควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยกังหันลม

ชื่อแผนงานวิจัย (ภาษาไทย) ชุดควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยกังหันลม

(ภาษาอังกฤษ) Power Quality Controller and Compensate of Wind-Electricity Generation

วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย

สร้างชุดควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยกังหันลมด้วยการวิเคราะห์แรงดันที่ได้จากระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลมแบบแม่เหล็กถาวร พร้อมสร้างและวิเคราะห์ชุดควบคุมคุณภาพไฟฟ้าและสร้างชุดป้องกันระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลมเมื่อในระบบ เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบพร้อมชุดวัดประมวลผลและจัดการพลังงานมีระบบผ่านทางคอมพิวเตอร์

กรอบแผนงานวิจัยภาพรวม

ในระบบการควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยกังหันลมนั้นประกอบด้วย 4 โครงการย่อย ซึ่งแต่ละโครงการย่อยมีความสำคัญดังนี้

ชื่อโครงการวิจัยภายใต้แผนงานวิจัย (1)

(ภาษาไทย) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลม

(ภาษาอังกฤษ)Analysis of output voltage of permanence magnet generator for wind-electricity generation

รายละเอียดโครงการย่อยที่ 1. เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลม ดังที่ได้ทราบว่าการหมุนของกังหันขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เราไม่สามารถบังคับให้มีขนาดตามที่เรต้องการได้ ดังนั้นการหมุนของเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจึงได้ค่าของแรงดันที่ออกมาแปรปรวนตามกันไป ในโครงการจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมของพลังงานลมที่เข้ามาโดยใช้ Wind Speed And Directional Analyzer Meter ทำการวัดกับการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาเพื่อทำการแก้ไขปัญหาลงแรงดันต่อไป

ชื่อโครงการวิจัยภายใต้แผนงานวิจัย (2)

(ภาษาไทย) การวิเคราะห์และสร้างชุดป้องกันการเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้า ด้วยโซลิดสเตทเซอร์กิตเบรกเกอร์

(ภาษาอังกฤษ) Analysis and Design faults protection of power system with Solid state Circuit Breaker

รายละเอียดโครงการย่อยที่ 2. เป็นการวิเคราะห์และสร้างชุดป้องกันการเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้า ด้วยโซลิดสเตทเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นการนำทฤษฎีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เป็นตัวตัดต่อระบบเมื่อเกิดสถานะแรงดันเกินพิกัด การป้องกันระบบต้องการความรวดเร็ว และความแม่นยำในการตัดต่อระบบที่สูง ดังนั้นคณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวมาสร้างเป็นระบบป้องกันขึ้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบที่ดี

ชื่อโครงการวิจัยภายใต้แผนงานวิจัย (3)

(ภาษาไทย) การวิเคราะห์และออกแบบชุดชดเชยแรงดัน ปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลม

(ภาษาอังกฤษ) Analysis and Design control of Compensator for voltage variable improvement of generator for wind-electricity generation

รายละเอียดโครงการย่อยที่ 3. เป็นการวิเคราะห์และออกแบบสร้างชุดชดเชยปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลม โดยการนำเทคนิคของ FACTS ซึ่งเป็นพื้นฐานของการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาสร้างชุดควบคุมการชดเชยแรงดัน ในสถานะเมื่อในระบบไฟฟ้ามีความผิดปกติของแรงดันขึ้น เพื่อทำการควบคุมคุณภาพของแรงดันที่เข้ามาให้ดีขึ้นก่อนจ่ายไปยังโหลด

ชื่อโครงการวิจัยภายใต้แผนงานวิจัย (4)

(ภาษาไทย) ระบบวัดและประมวลผลพลังงานจากกังหันลมแบบฝังตัว

(ภาษาอังกฤษ) Embedded monitoring system for wind turbine electrification

รายละเอียดโครงการย่อยที่ 4. เป็นระบบการวัดและประมวลผลพลังงานจากกังหันลมแบบฝังตัว ให้เห็นพฤติกรรมและการบันทึกข้อมูล ของความเร็วลมในแต่ละเวลา บันทึกข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันลม และบันทึกข้อมูลการชดเชยแรงดันเข้าระบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงจำนวนครั้งของการเกิดแรงดันเกิน และแรงดันตก ในระบบได้ อีกทั้งยังนำผลที่ได้ทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันมาทำการปรับปรุงต่อไปในอนาคต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับหรือพึงจากการเผยแพร่ในครั้งนี้

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยี ระบบการควบคุมให้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนแบบอื่นๆ ได้
2. ส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อพัฒนาประเทศไปสู่การพึ่งพาตนเองต่อไป
3. เป็นการพัฒนาทุนทางทรัพยากรธรรมชาติด้านพลังงานทดแทน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงเศรษฐกิจ
4. เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในระบบการควบคุม สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมต่อไป

การตรวจตัวจับและปรับปรุงสัญญาณแรงดันที่ความถี่ต่างๆ ด้วยวิธีการอย่างง่าย เพื่อควบคุมชุดชดเชยแรงดันในระบบไฟฟ้า

Voltage Detection and Voltage Implement at Different Frequency with Simple method for Compensator

วารุณี ศรีสงคราม* ฐิติพงศ์ พันชนะ** ประมุข อุณหเลขกะ* กิตติวัฒน์ เชื้อเงิน***

*สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

***ABB Limited 322 ต.แพรกษา อ.เมือง จ.สมุทรปราการ

7/1 ม.1 ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี โทรสาร: 0-2969-1369-74 E-mail: warunecsi@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทดลองการตรวจจับและปรับปรุงสัญญาณแรงดันผิดปกติ ที่ความถี่ต่างๆ ให้มีคุณภาพของแรงดันที่ดี ก่อนเข้าสู่ชุดควบคุมการชดเชยแรงดันในระบบไฟฟ้า ขณะที่แรงดันเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยชุดตรวจจับและปรับปรุงสัญญาณแรงดันดังกล่าวได้นำเสนอวิธีการอย่างง่ายด้วยวิธีการควบคุมบนแกนเวกเตอร์ ในแกนหมุน (Stationary reference frame: SRF) และวิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที (Recursive DFT) ตามลำดับ ซึ่งเป็นหลักการทางคณิตศาสตร์โดยกระทำการบนบอร์ค DSP โดยใช้โปรแกรมภาษา C เป็นตัวประมวลผล ซึ่งบอร์คดังกล่าวจะรับสัญญาณจากชุดการตรวจจับแรงดัน เพื่อให้ได้สัญญาณแรงดันที่ดีก่อนนำไปใช้ควบคุมการสั่งการ ชุดชดเชยแรงดันในระบบต่อไป จากผลการวิจัยพบว่าชุดตรวจจับแรงดันสามารถตรวจจับแรงดันได้ที่เวลา 0.05 วินาที หรือ 0.5 ไซเคิล ในขณะที่แรงดันในระบบเกิดความผิดปกติ และชุดปรับปรุงสัญญาณแรงดันสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนและฮาร์โมนิกต่างๆ ที่แรงดันทุกความถี่ออกจากระบบได้ ทำให้ได้สัญญาณแรงดันที่ดีสำหรับนำไปสั่งการให้ชุดควบคุมการชดเชยแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

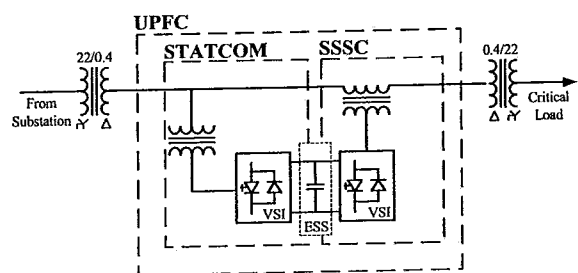
คำสำคัญ: การตรวจจับแรงดัน, รีเคอร์ซีฟ ดีเอฟที, ตัวชดเชยแรงดัน

Abstract

This paper proposes experiments to system of fluctuation voltage detection and signal voltage implement. After the voltage passed this system, its quality is improved while faults are occurred in the power system, before passing to the compensator controller. The stationary referent frame : SRF , and recursive DFT are simple method .Its applied in this system. The result of experiments, that system can clearly remove noise and harmonics every frequency ,and detected fault in 3 phase power system at 0.04 seconds in a prior fault cycle. Therefore, the time of the compensating detection is acceptable that we have referred the IEEE1159:1995 standard. So, this signal voltage suitable for control the power system to a stable.

1. บทนำ

ผลกระทบจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Fluctuation) ทำให้ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมมีการทำงานที่ผิดปกติไป ส่งผลให้เครื่องจักรหยุดการทำงานได้ หรือบางครั้งระบบการควบคุมคอมพิวเตอร์ มีการทำงานผิดพลาดหรือสภาวะการทำงานในบางขั้นตอนล้มเหลวได้ นั้นเป็นผลกระทบโดยตรงและสร้างความเสียหายค่อนข้างสูงต่อผู้ประกอบการ วิธีการแก้ไขปัญหามีด้วยกันหลายวิธีเพื่อให้แก้ไขคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบให้ดียิ่งขึ้น การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า หรือการชดเชยแรงดันไฟฟ้า (Compensator) เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจของวิธีการที่ดีในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในการสร้างชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบไฟฟ้าดังกล่าวทำได้ 3 วิธี โดยทั่วไปคือ การต่อชุดควบคุมอนุกรมเข้าในระบบไฟฟ้า (SSSC) ต่อแบบขนาน (STATCOM) และต่อแบบผสมกันระหว่างอนุกรมกับขนาน (UPFC) หรือที่รู้จักกันคือระบบการส่งกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ (FACTS) ซึ่งใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาช่วยในการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 1.



รูปที่ 1. การต่อชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเข้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ด้วยเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจคิดสร้างชุดการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยเลือกวิธีการขนานเข้าไปยังระบบไฟฟ้า นั่นคือตัวชดเชยแบบสถิตหรือที่นิยมเรียกว่า STATCOM ปัญหาที่สำคัญของการควบคุมกำลังไฟฟ้านั้นคือ การรับรู้ถึงผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้อย่างรวดเร็ว และสั่งการให้ชุดควบคุมการชดเชยแรงดันเข้าในระบบอย่างรวดเร็วได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำนั้น ต้องมีตัวตรวจจับที่ดี ดังนั้นก่อน

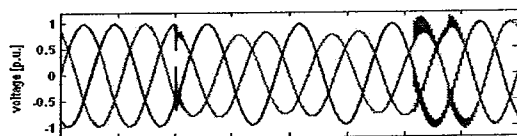
การสร้างชุดควบคุมดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ ทำการหาวิธีการการตรวจจับแรงดันในระบบ [1] ด้วยกัน 4 วิธีการ คือ วิธีการ RMS, FFT, Peak Sequence Analysis , DQ method ด้วยวิธีการจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งพบว่า วิธีการตรวจจับแบบ DQ เป็นวิธีการการตรวจจับแรงดันที่มีความไวมากที่สุด จากนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างชุดตัวตรวจจับดังกล่าว ด้วยวิธีการ DQ และเพื่อให้ได้คุณภาพของแรงดันที่ดี จึงนำสัญญาณแรงดันที่ตรวจจับได้มาทำการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้วิธีการรีเคอร์ซีฟ DFT (Recursive DFT) เข้าร่วมด้วย เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีสำหรับชุดควบคุมต่อไป

2. ระบบส่งกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System devices : FACTS) [2] ตามมาตรฐาน IEEE หมายถึงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมแบบสถิต (static controller devices) อย่างอื่น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและส่งเสริมการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง [3] ความสามารถหลักของอุปกรณ์คือ การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การควบคุมแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถควบคุมได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชดเชยอย่างเดิม เช่น คาปาซิเตอร์แบงก์ (capacitor bank) รีแอคเตอร์ชาน (shunt reactor) และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (synchronous condenser) ดังแสดงการต่อชุดควบคุมดังกล่าวดังรูปที่ 1.

3. การเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (rms) ที่ไม่เกิน 0.9 – 1.0 pu. ทั้งแบบเป็นระบบและแบบไม่ต่อเนื่อง บางครั้งเรียกว่า flicker คือ ไฟกระพริบเช่น การทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า (Arc furnace) หรือการสตาร์ทโหลดขนาดใหญ่

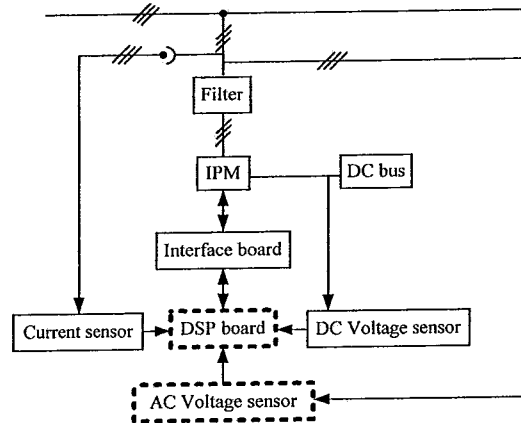


รูปที่ 2 การเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

ผลกระทบของการเกิดแรงดันไฟกระพริบ เช่น ในระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรจะเกิดการทำงานผิดพลาด หรือ ทำให้เครื่องจักรเกิดการ Break Down มอเตอร์ซึ่งมี Magnetic Shorter หรือ Thyristor Control หยุดการทำงาน ระบบคอมพิวเตอร์ มีการทำงานผิดพลาดหรือสภาวะการทำงานในบางขั้นตอนล้มเหลวเป็นต้น

4. การสร้างชุดตรวจจับแรงดัน

จากรูปที่ 3 เป็นชุดควบคุมการชดเชยแรงดันแบบขนานที่ผู้วิจัยอยู่ในขั้นตอนการสร้าง ส่วนในบทความนี้ได้อธิบายเพียงในส่วนของการตรวจจับและการปรับปรุงค่าสัญญาณของแรงดัน ดังแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในส่วนนี้เป็นประตุนำสัญญาณที่สำคัญต่อระบบเป็นอย่างมาก เพราะเราต้องนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้ในการควบคุมในชุดต่างๆให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงต่อการชดเชยแรงดันในระบบ



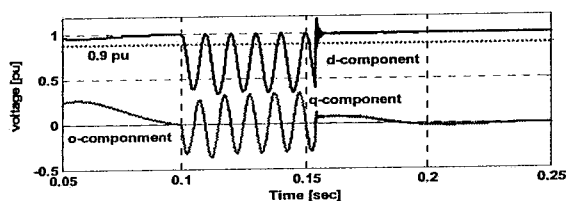
รูปที่ 3 ชุดการตรวจจับแรงดันในระบบการควบคุมการชดเชยแรงดัน

4.1 วิธีการตรวจจับแรงดัน (dq detection method)

วิธีการตรวจจับแรงดัน ดังนั้นในบทความนี้ใช้วิธีการควบคุมบนแกนเวกเตอร์ในแกนหมุน (Stationary reference frame: SRF) ตามการวิจัยมาเบื้องต้นมาแล้วนั้น ซึ่งทำโดยการแปลงแกนของเวกเตอร์จากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นแกนเวกเตอร์ 1 เฟส จากสมการที่ 1 เป็นการหาค่ามุมของแรงดัน V_α และ V_β จากระบบไฟฟ้า 3 เฟส [4] แล้วนำไปหาค่าของ V_d และ V_q จากสมการที่ 2 จึงได้สัญญาณแรงดันในแกน dq ดังรูปที่ 4

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

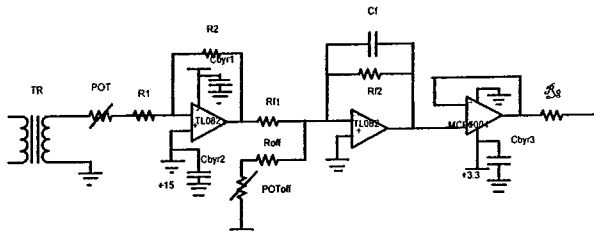
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$



รูปที่ 4 สัญญาณภาพ d และ q component

4.2 วงจรการตรวจจับแรงดันกระแสสลับ

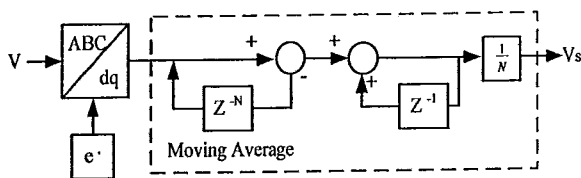
ตัวตรวจจับแรงดันกระแสสลับ (AC voltage sensor) หรือ ตัววัดแรงดัน เป็นส่วนใช้วัดแรงดันของระบบไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในการควบคุมระดับแรงดันให้ได้ตามที่ต้องการ สำหรับการวัดแรงดัน AC จะใช้หม้อแปลงลดขนาดแรงดันลง ดังแสดงของวงจรในรูปที่ 5 และต่อเข้ากับวงจรปรับสัญญาณให้เหมาะสมกับการใช้งานกับบอร์ด DSP



รูปที่ 5 ตัวตรวจจับแรงดันกระแสสลับ

5. วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

หลังจากที่มีการตรวจจับและคำนวณองค์ประกอบของแรงดันหลักมูลสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส และ ทำให้อยู่ในแกนอ้างอิงของ dq ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 แล้วนั้น จะใช้วิธีการคำนวณหาค่าประกอบแรงดันโดยวิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที [5],[6],[7] บนแกนอ้างอิงหมุนที่มีความถี่หลักมูล ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นวิธีการอย่างง่ายในทางปฏิบัติจริงและมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วเพียงพอ หลังจากแรงดันที่ตรวจจับได้ถูกแปลงอยู่ในรูปของ dq ซึ่งเดิมมีความถี่ 50 Hz จะกลายเป็นสัญญาณไฟตรง ส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกและองค์ประกอบมูลฐานจะยังคงเป็นสัญญาณกระแสสลับ จากนั้นนำแรงดันที่ได้มาผ่านตัวกรองแบบมูฟวิงเอเวอร์เรจ (Moving average) ดังสมการที่ 3 ที่ความยาวครึ่งคาบของความถี่หลักมูลเพื่อแยกเอาเฉพาะสัญญาณไฟตรง นั่นคือขนาดของแรงดันหลักมูลที่ตรวจจับได้นั่นเอง



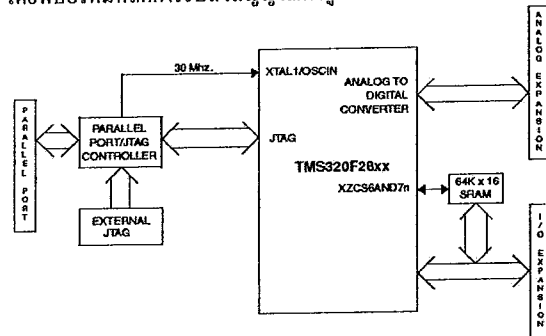
รูปที่ 6 วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

$$D_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad (3)$$

6 ตัวประมวลผลสัญญาณแรงดัน

ตัวประมวลผลหรือบอร์ด DSP (Digital Signal Processing) เป็นบอร์ดที่ใช้ควบคุมการสร้างกระแสเพื่อรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันให้สอดคล้องกัน โดยรับสัญญาณมาจากส่วนวัดกระแส ส่วนวัดแรงดันกระแสสลับ และ ส่วนวัดแรงดัน

กระแสตรง ดังรูปที่ 7 ของชุดควบคุมการชดเชยแรงดันเข้าไปประมวลผลตามการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C ในการควบคุมการรับส่งสัญญาณโดยที่บอร์ดมีหลักการรับส่งสัญญาณดังรูปที่ 7

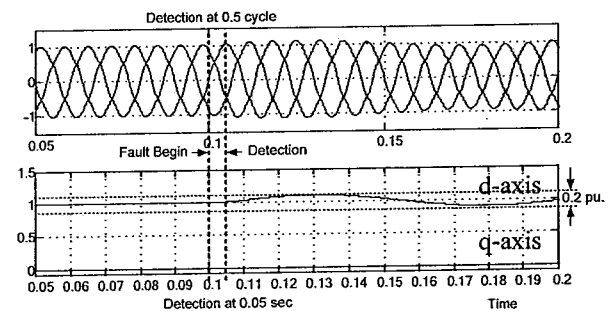


รูปที่ 7 หลักการส่งสัญญาณของบอร์ด DSP

6. ผลการทดลอง

การทดลองชุดตรวจจับแรงดันและชุดปรับปรุงสัญญาณแรงดันในระบบไฟฟ้า ทดสอบโดยการสร้างสถานะการให้ในระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติขึ้นที่เวลา 0.1 วินาที สัญญาณแรงดันมีความเปลี่ยนแปลงขึ้น ณ เวลาดังกล่าวที่ความถี่ 15 Hz และ 25 Hz

6.1 ผลการตรวจจับแรงดัน



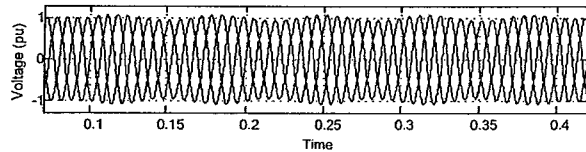
รูปที่ 8 สัญญาณการตรวจจับแรงดันในระบบ

จากรูปที่ 8 ผลการตรวจจับแรงดันพบว่าชุดตรวจจับแรงดันสามารถตรวจจับแรงดันได้ที่เวลา 0.105 วินาที หลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบที่เวลา 0.1 วินาที นั่นหมายความว่า ชุดตรวจจับแรงดันสามารถตรวจจับได้ในเวลาเพียง 0.04 วินาที ที่ตรวจพบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขึ้น หรือที่ 0.4 ไซเคิล ของแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขึ้น ลงอยู่ที่ 0.2 pu. ซึ่งจะเห็นได้ว่าชุดตรวจจับมีความเร็วพอต่อการนำไปใช้สั่งการให้ชุดควบคุมได้ต่อไป

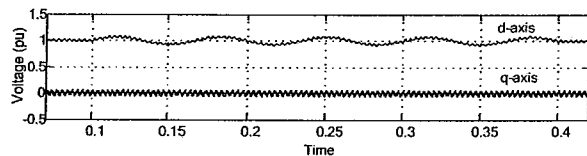
6.2 ผลการปรับปรุงสัญญาณแรงดัน

จากการทดสอบตัวปรับปรุงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ทำโดยการนำค่าสัญญาณที่ตรวจจับได้ผ่านชุดรีเคอร์ซีฟ ดีเอฟที ที่แรงดันการเปลี่ยนแปลงหลายๆความถี่ โดยบทความนี้ได้ค้นคว้าอย่างมา 2 ความถี่ คือ 15 Hz และ 25 Hz จากรูป 9 และ 10 ก. เป็นสัญญาณแรงดันในระบบที่มี

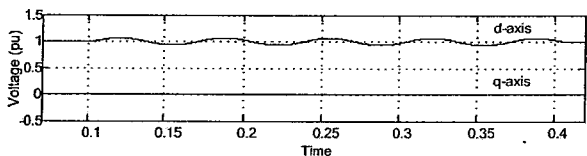
การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ 0.2 p.u ที่ 15 Hz และ 25 Hz ตามลำดับ ของ
การเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ เวลา 0.1 วินาที ถึง 0.4 วินาที



รูปที่ 9. สัญญาณแรงดันกระแสสลับที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ 15 Hz



รูปที่ 10. สัญญาณแรงดัน dq ก่อนเข้าสู่รีเฟรชเฟรม ดีเอฟที ที่ 15 Hz

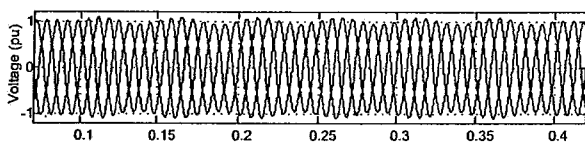


รูปที่ 11. สัญญาณแรงดัน dq ที่ออกจากชุดรีเฟรชเฟรม ดีเอฟที ที่ 15 Hz

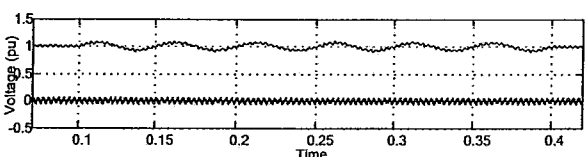
รูปที่ 12. การปรับปรุงสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ 15 Hz

จากรูป 10. พบว่าสัญญาณแรงดันที่ยังไม่ได้ผ่านรีเฟรชเฟรม ดีเอฟทีโดย
มีสัญญาณแรงดันอยู่ในรูปของ dq จะเห็นได้ว่ามีสัญญาณรบกวน หรือ
ฮาร์โมนิกขึ้นอยู่บนสัญญาณจำนวนมาก นั่นคือถ้าเรานำสัญญาณดังกล่าว
ไปใช้งานในการควบคุม จะส่งผลกระทบต่อควบคุมที่ไม่เที่ยงตรงต่อระบบ
แสดงดังรูปที่ 9 และ 10 ข.

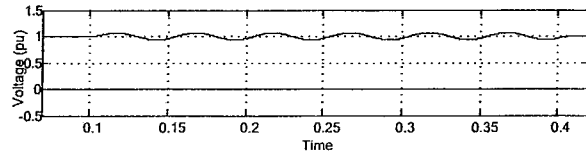
จากรูป 11. เป็นสัญญาณแรงดัน dq ที่ออกจากชุดรีเฟรชเฟรม ดีเอฟทีที่
เรียบร้อยแล้ว ซึ่งเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้มีความเรียบของสัญญาณมากขึ้น
นั่นหมายถึงชุดตรวจวัดแรงดันที่มีการคิดตั้งชุดรีเฟรชเฟรม ดีเอฟทีที่เข้า
ด้วยกันจะช่วยกำจัดสัญญาณรบกวนหรือ ฮาร์โมนิกออกไป ทำให้ได้
สัญญาณที่ดีในการนำไปควบคุมระบบต่อไป ดังรูปที่ 12 และ 13 ค.



รูปที่ 13. สัญญาณแรงดันกระแสสลับที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ 25 Hz



รูปที่ 14. สัญญาณแรงดัน dq ก่อนเข้าสู่รีเฟรชเฟรม ดีเอฟที ที่ 25 Hz



รูปที่ 15. สัญญาณแรงดัน dq ที่ออกจากชุดรีเฟรชเฟรม ดีเอฟที ที่ 25 Hz

รูปที่ 16. การปรับปรุงสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ 25 Hz

7. บทสรุป

จากผลการวิจัยการทดลองชุดตรวจวัดแรงดัน ที่มีการคิดตั้งชุดรีเฟรชเฟรม ดีเอฟทีที่เข้าด้วยกัน เพื่อได้สร้างสัญญาณแรงดันที่ดี ก่อนส่งการ
ใช้ชุดตรวจวัดแรงดันเข้าในระบบไฟฟ้านั้นพบว่า ชุดตรวจวัดแรงดัน
สามารถตรวจวัดแรงดันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบได้เป็นเวลา 0.04
วินาที หรือก่อนครั้ง ไซเคิล ซึ่งมีความเร็วเป็นที่ยอมรับได้ในมาตรฐาน
ของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน IEEE1159[8] อีกทั้งการปรับปรุงสัญญาณ
แรงดันด้วยวิธีการของรีเฟรชเฟรม ดีเอฟที ยังสามารถช่วยกำจัดสัญญาณ
รบกวนที่มีผลต่อการส่งการควบคุมให้หมดไป นั่นหมายถึงสัญญาณ
แรงดันที่ได้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมที่ดี
ต่อการควบคุมต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วรณัฐ ศรีสงคราม, วันชัย ทรัพย์สิงห์ และไพศาล บุญเยี่ยม, “การเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดแรงดันตกชั่วครู่ไม่สมมาตร เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า,” *cecon*, ครั้งที่ 29, 9-10 พฤศจิกายน 2549,
- [2] N.G.Hingorani and L. Gyugyi, “Understanding FACTS” *IEEE Trans. Power Engineering Society*, pp.1-29, 2000.
- [3] A. Ghosh and G. Ledwich, “Power Quality enhancement using custom power devices,” London , pp.1-54 , 2002.
- [4] Q.Zeng and L.Chang , “ A new method for three-phase detection and protection based on reference frame transformation, ” *IEEEPower Electronics Specialists Conference*. Aachen, Germany,2004
- [5] กิตติวัฒน์ เชื้อเงิน, การลดความยุ่งยากของอัลกอริทึมการควบคุมสำหรับตัวชดเชยแรงดันตกชั่วขณะจากมุมมองเชิงปฏิบัติ, *วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2549.
- [6] Nakano et al., “Frequency Detection Method Based on Recursive DFT Algorithm,” *PSCC 14th*, 24-28 June 2002, Sevilla .
- [7] ประจวบ บุญศรีรัมย์, วงจรกรองกำลังแอกทีฟพิกัดสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีเฟรชเฟรม ดีเอฟที, *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2545.
- [8] IEEE 1159 : 1995, *IEEE Recommended Practices on Monitoring Electric Power Quality*.

แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

Modeling of Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator

วสันต์ เพชรพิมูล¹ ฤกษ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์¹ วิรัช โยชนรินทร์¹ ประมุข อุณหเลขกะ² และวราณี ศรีสงคราม³

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3571

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3571

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW โดยมีการออกแบบวงจรรวมทั้งหมด 3 ส่วน คือวงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทอร์คและวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสต่อเข้าระบบ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงครั้งที่ใช้วงจรทอร์คในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก ที่มีเสถียรภาพที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB - SIMULINK เพื่อนำไปสู่การพัฒนาระบบฮาร์ดแวร์ต่อไป

คำสำคัญ: กังหันลมผลิตไฟฟ้า, แม่เหล็กถาวร, วงจรเรียงกระแส, วงจรทอร์ค และวงจรอินเวอร์เตอร์

Abstract

This paper presents modeling of wind turbine driving 1 kW Permanent magnet generator. The system design consists of 3 parts, namely rectifier circuit, boost converter and inverter. To control the DC voltage, boost converter is carried out the constant at the rating DC voltage. Inverter is AC-to-DC converter for generating the line voltage. Synchronous rectifier frame and PI control are used to control the wind turbine system by using MATLAB with Simulink. The results show that the control circuit and control the DC voltage with boost converter and AC voltage with inverter circuit. This development is the first of research. Next step will build up the hardware for observing the performance of the system.

Keywords: Wind turbine, Permanent Magnet, Rectifier circuit, Boost converter, Inverter circuit

1. บทนำ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมปัจจุบันนี้จำเป็นต้องพิจารณาความเร็วลมของแต่ละพื้นที่เป็นสำคัญ เพื่อให้วิศวกรสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้อย่างถูกต้อง สำหรับการเพิ่มกำลังด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ลดเสียงรบกวนและองค์ประกอบอื่นๆ

ที่เกิดขึ้นจากกังหันลม แต่การออกแบบที่ซับซ้อนจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมมีราคาแพงซึ่งเป็นที่ไม่ต้องการ บทความนี้จึงทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีวงจรเรียงกระแสประโยชน์ของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรและวงจรเรียงกระแสเพราะมีประสิทธิภาพสูงและราคาถูก โครงการวิจัยนี้จะมุ่งไปที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW, 48 V, 400 rpm ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้สำหรับพื้นที่ๆ มีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 5-7 m/s

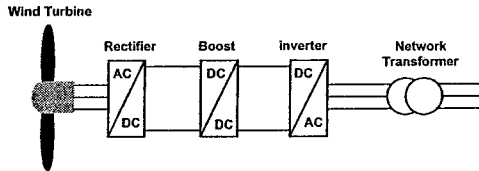
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบที่พิจารณาในโครงการวิจัยนี้โครงสร้างหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรเรียงกระแส วงจรทอร์คแรงดันและวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ประโยชน์ของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่ต่อกับวงจรเรียงกระแสตามที่กล่าวมาแล้วนั้น เพราะการสูญเสียต่ำและราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น การใช้วงจรเรียงกระแสจะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำอาจจะต้องการกระแสสูงเพื่อไปสร้างกระแสสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

องค์ประกอบของบทความนี้ประกอบด้วย ส่วนแรกเราจะกล่าวถึงระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรต่อมาส่วนประกอบต่างๆ พร้อมทั้งอธิบายแบบจำลองเชิงสมการแทนหมุน (Rotating reference frame) และแกนนิ่ง (Stationary reference frame) ส่วนที่สามจะกล่าวถึงการออกแบบ ผลการทำสอบ และสุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ

2. ส่วนประกอบของระบบ (System Components)

การจำลองการทำงานของระบบจะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink [3] และจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทอร์ค และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอ

เมื่อพิจารณากำลังและแรงบิดเชิงกลที่สร้างจากกังหันลมดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) [1]

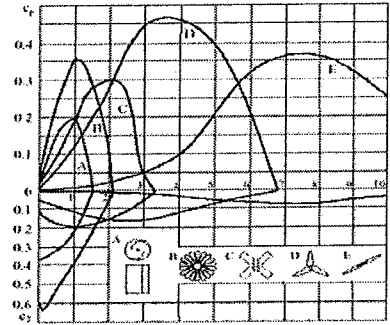
$$P_m = \frac{1}{2} C_p r \rho R^2 u^3 \quad (1)$$

$$T_m = \frac{1}{2} C_T r \rho R^3 u^2 \quad (2)$$

เมื่อ P_m , T_m คือ กำลังและแรงบิดเชิงกลที่ถูกสร้างจากกังหันลมตามลำดับ, ρ คือ ความหนาแน่นของลม (Kg/m^3), R คือ รัศมีของใบพัด (m), u คือ ความเร็วของลม และ C_p , C_T คือ สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิดของกังหันลมตามลำดับ เมื่อความเร็วของลมเปลี่ยนความเร็วเชิงมุมของเพลา ω_m ถูกปรับเพื่อให้ได้ค่า C_p ที่เหมาะสมที่สุด นั่นหมายถึง ω_m และ ความเร็วลมจะหลอมรวมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรเดียว และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p และ ω_m ได้สำหรับตัวแปรเดียวนี้ถูกเรียกว่าอัตราส่วนของความเร็วจุดปลายสุด $R\omega_m$ ต่อความเร็วลม u อัตราส่วนความเร็วจุดปลายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{u} \quad (3)$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของเพลา (rad/sec) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_T และ λ สำหรับแต่ละชนิดของกังหันลมแสดงได้ในรูปที่ 2 [2] จากสมการที่ (3) ค่า C_p และ C_T เป็นฟังก์ชันของ λ โดยมีความสัมพันธ์คือ $C_T = C_p / \lambda$ จากรูปที่ 2 เราจะเลือกชนิดของกังหันที่ให้กำลังออกมาสูงสุด ดังนั้นในการจำลองการทำงานที่ความเร็วต่างกัน ความเร็วเชิงมุมควรจะถูกควบคุมให้ทำงานที่ค่า λ ใกล้เคียง 3.8 (จากกราฟ กังหันลมชนิด D ถูกเลือก) โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะจ่ายไปที่โหลด การควบคุมอัตราส่วนคาบเวลาของวงจรทอร์ค และดัชนีการมอดูเลชัน ของอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้ซึ่งอธิบายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของระหว่าง C_p , C_T และ λ ของกังหันลมต่างๆ

2.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG)

สมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงกันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (4)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, i คือกระแสไฟฟ้าด้านนอก, ψ คือ เส้นแรงแม่เหล็กคูลอง, R คือความต้านทาน, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ตัวชี้ d และ q คือองค์ประกอบอ้างอิงสำหรับแกนนิ่งตามลำดับ [4] และ s คือสเตรเตอร์ ค่าทั้งหมดจะแสดงในหน่วยต่อยูนิท (per unit) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าต่อยูนิทสามารถหาได้ใน [5] เส้นแรงแม่เหล็กคูลอง สามารถหาได้จาก

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{os}) i_{qs} \quad (6)$$

$$\psi_{ds} = (L_{dm} + L_{os}) i_{ds} + \psi_f \quad (7)$$

เมื่อ ψ_f คือ เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเพื่อที่จะวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย สภาวะชั่วคราวจะละเลย [1] ดังนั้นสมการที่ (6) และ (7) สามารถนำไปแทนลงในสมการที่ (4) และ (5) ได้ดังนี้

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m (L_{dm} + L_{os}) i_{ds} + \omega_m \psi_f \quad (8)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m (L_{qm} + L_{os}) i_{qs} \quad (9)$$

เมื่อ L_{qm} , L_{dm} คือค่าความเหนี่ยวนะรวมในแกน q และ d ตามลำดับ และ L_{os} คือ ความเหนี่ยวนะรั่วไหลในสเตเตอร์ แรงบิดในช่องอากาศ T_{ag} สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{ag} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} = \psi_f i_{qs} + (L_{dm} - L_{qm}) i_{ds} i_{qs} \quad (10)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (11)$$

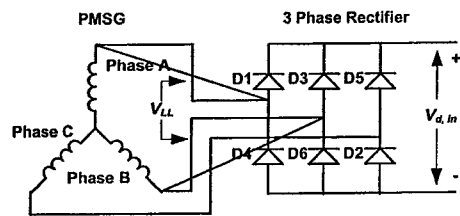
$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (12)$$

2.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟส (Three-phase diode rectifier)

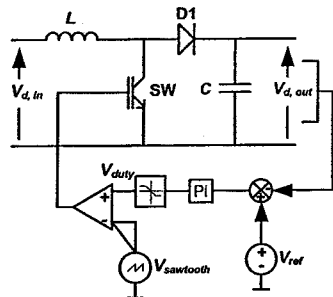
วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดเป็นวงจรรอง่าย ราคาถูก และใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ข้อเสียของไดโอดไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าไหลได้สองทางได้ แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยละเลยเงื่อนไขการ overlap กัน

$$V_{d,in} = \frac{3\sqrt{2}V_{LL}}{\pi} \quad (13)$$

เมื่อ $V_{d,in}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส หรือ แรงดันด้านเข้าวงจรทอร์ค V_{LL} คือ แรงดันสายด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3 วงจรเรียงกระแสสำหรับระบบกังหันผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4 วงจรทอร์ค

2.4 วงจรทอร์ค (Boost Converter)

รูปที่ 4 แสดงวงจรทอร์คแรงดันและการควบคุม ซึ่งวงจรนี้ แรงดันด้านออกปกติจะมากกว่าแรงดันด้านเข้าเสมอ วงจรทอร์คจะควบคุมแรงดันด้านออกโดยใช้การควบคุมคาบเวลาการสวิตช์เมื่อแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก และกระแสของวงจรทอร์คสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (14) ดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{d,out}}{V_{d,in}} = \frac{1}{1-D} \quad (14)$$

เมื่อ $V_{d,out}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรทอร์ค D คือ อัตราส่วนคาบเวลา $I_{d,in}, I_{d,out}$ คือ กระแสด้านเข้าและด้านออกของวงจรทอร์คตามลำดับ อัตราส่วนคาบเวลาที่ต้องการสำหรับเงื่อนไขการทำงานกระแสต่อเนื่อง (Continuous Mode) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$D = 1 - \left(\frac{V_{d,in}}{V_{d,out}} \right) \quad (15)$$

แรงดันด้านออกของวงจรทอร์คในเทอมของแรงดันด้านเข้าและอัตราส่วนคาบเวลาแสดงได้ในสมการที่ (16)

$$V_{d,out} = \frac{V_{d,in}}{(1-D)} \quad (16)$$

รูปคลื่นในสถานะคงตัวของแรงดันและกระแสในตัวเหนี่ยวนำในโหลดการทำงานกระแสต่อเนื่อง [$i_L(t) > 0$] ค่าระลอกของแรงดันด้านออก $\Delta V_{d,out}$ ในโหลดกระแสต่อเนื่องสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta V_{d,out} = \frac{I_{d,out} D}{C f_{sb}} \quad (17)$$

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการสวิตช์แบบปรับความกว้างของพัลส์ถูกค้นพบครั้งแรกตั้งแต่ปี 1964 [7] การควบคุมแบบนี้จะประมวลผลภายใต้เงื่อนไขความถี่การสวิตช์ (f_s) และอัตราส่วนความถี่ของสัญญาณคำสั่ง และอัตราส่วนแรงดันด้านเข้าและด้านออก บางครั้งเรียกว่าดัชนีการมอดูเลชัน (m_f) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (18)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{\hat{V}_{LLC}}{V_{d,out}} \quad (18)$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่าของสัญญาณควบคุม \hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม อัตราส่วนมอดูเลชันความถี่ m_f แสดงได้ดังนี้

$$m_f = \frac{f_s}{f_i} \quad (19)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ f_i คือ ความถี่หลักมูล การควบคุมแรงดันด้านออกจะพยายามลดส่วนของแรงดันผิดเพี้ยนจากแรงดันคำสั่ง ค่าความผิดเพี้ยนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า m_f อยู่ในย่าน over-modulation ($m_f > 1$) ในย่านเชิงเส้น ($m_f < 1$) ส่วนประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตาม m_f ดังแสดงในสมการที่ (18) แรงดันด้านออกที่ความถี่หลักมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{LLC} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (m_a V_{d,out}) \quad (20)$$

แทนค่าสมการที่ (16) ลงในสมการที่ (20) จะได้

$$V_{LLC} = m_a \left[\frac{\sqrt{3} V_{d,in}}{2\sqrt{2} (1-D)} \right] \quad (21)$$

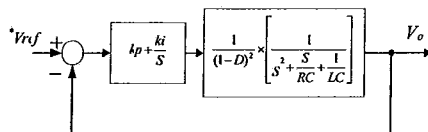
3. การออกแบบ

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด กำลังไฟฟ้า 1 kW แรงดัน 48 V ที่ความเร็ว 400 rpm โดยงานวิจัยนี้ กำหนดแรงดันด้านเข้า 48 V แรงดันด้านออก 100 V ที่ระลอกแรงดัน 10 % ที่ความถี่สวิช 10 KHz เราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ของวงจรทระดับได้จากสมการที่ (22) และ (23) ตามลำดับ

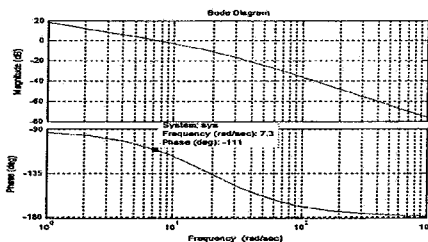
$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (22)$$

$$C = \frac{D}{Rf_s \frac{\Delta v}{v}} \quad (23)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (22) และ(23) จะได้ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ คือ $L = 60 \mu F$ $C = 5,200 \mu F$ $R = 10 \Omega$ $D = 0.52$ โดยระบบจะควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดังรูปที่ 5 ในการหาค่า k_p k_i โดยการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ ด้วย Ziegler-Nichols โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากกราฟผลตอบสนองจะได้ $k_p = 156$ $k_i = 0.5$ และจะได้แผนภาพโบลดังรูปที่ 6

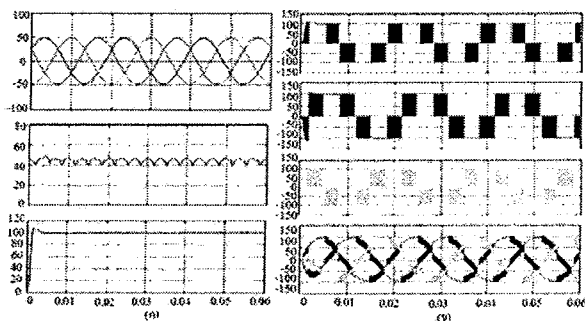


รูปที่ 5 การควบคุมแรงดันของวงจรทระดับ

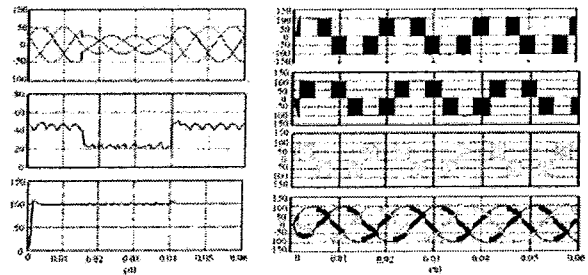


รูปที่ 6 แผนภาพโบลของระบบควบคุมวงรอบเปิดที่ได้ทำกาออกแบบ

4. ผลการจำลอง



รูปที่ 7 สัญญาณต่างๆ ของกรณีที่ 1 (ก) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียง กระแส แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส และแรงดันด้านออกของ วงจรทระดับ ตามลำดับ (ข) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ สามเฟส



รูปที่ 8 สัญญาณต่างๆ ของกรณีที่ 2 (ก) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียง กระแส แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส และแรงดันด้านออกของ วงจรทระดับ ตามลำดับ (ข) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ สามเฟส

5. สรุป

แบบจำลองและผลการจำลองการทำงานของระบบกังหันลม ผลิตไฟฟ้าที่วิเคราะห์ในโครงการวิจัยนี้ เป็นระบบที่มีราคาถูก และ ประสิทธิภาพการทำงานสูง น้ำหนักเบา ระบบที่น่าเสนอจะได้กำลังด้าน ออกสูงสุดเมื่อเลือกค่า C_p ที่เหมาะสม การควบคุมจะใช้วงจรควบคุม แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ และให้วงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแรงดัน ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากแรงดันด้านเข้าของวงจร เรียงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แต่ยังมีมีการรักษาระดับแรงดัน ตามที่ต้องการได้ การทำงานทั้งหมดมีเสถียรภาพสูงที่ความเร็วลม เปลี่ยนแปลง และฮาร์มอนิกต่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์สันติภาพ โคตรทะเล ที่เอื้อเฟื้อ ข้อมูล และให้คำปรึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Johnson, G. L. *Wind Energy Systems*. England Cliffs: Prentice-Hall, 2001.
- [2] Mohan, N.; Undeland, T. and Robbins, W. *Power Electronics Converters, Application and Design*. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [3] Schonung, A. and Stemmler, H. "Static Frequency Changer with Sub-harmonics Control in Conjunction with Reversible Variable Speed ac Drives." *BBC Review*, Aug./Sep. 1964.
- [4] Nacfaire, H. *Grid Connected Wind Turbines*. London and New York: Elsevier Applied Science, 1988.
- [5] Eltamaly, Ali M. "A New Relation between Firing Angle of Three-phase SCR Converter and Best Reinjection Current Angle." *The 9th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON'2003*, Shebin El-Kom, Egypt, Dec. 2003, 793- 798.
- [6] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 2, ว.เ. ปรินติ้ง, 2547

THE 2nd RMUTP INTERNATIONAL CONFERENCE

2010

GREEN TECHNOLOGY AND PRODUCTIVITY

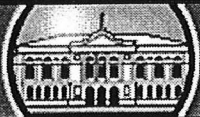
The 2nd RMUTP International Conference - Green Technology & Productivity



PROCEEDINGS

29-30 JUNE 2010

PATHUMWAN PRINCESS HOTEL
BANGKOK, THAILAND



TOMSK
STATE
UNIVERSITY

Fluctuation Voltage Control of Wind turbines via STATCOM

Warunee Srisongkram^{1*}, Krischonme Bhumkittipich², Pramuk Unahalekhaka¹,
Nattapong Phanthuna³, Wanida Pusorn², and Kittiwat Chiangchin⁴

1) Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology (RMUT)
Suvanabhumi

2) RMUT Thunyaburi, 3) RMUT Phra Nakhon, 4) ABB Company Limited

*Corresponding Author: Waruneesri@hotmail.com

Abstract

This paper presents distributed STATCOM for controlling voltage in distribution line with wind turbines generations at 48 volts. The connection of wind turbine to distribution systems may affect the voltage quality offered to the consumers. One of the factors contributing to this effect is the rapid variations of the wind turbine output power, which cause respective fluctuations in the supply voltage. This paper presents the design, control and analysis of a Distributed STATCOM when combined with a wind turbine comprising small variable speed generators, in this paper it is shown that the distributed STATCOM, controlled via a rotating referent frame: RRF and recursive DFT are simple method to DSP control technique. The result of experiments the STATCOM can improve the transient stability voltage of wind turbine, that we have referred the IEEE1159:1995 standard of power quality.

Key words: STATCOM, Recursive DFT, Wind turbines

1. Introduction

Voltage fluctuation is a power quality problem in a power transmission system which could effect to sensitive loads such as electronic loads, control board of a machine etc. The loads might malfunction, lose control or stop. Most industrial factory has many machines in a production process. [1] In the case, malfunction of a machine in the process could lead to the whole process failed, product damaged and a lot of money lost. Like the power transmission system, a system of power generating by a wind turbine might have the fluctuation voltage depending on the condition of wind which is the power source. An example of the voltage from a wind turbine is shown as Fig.1. [2]

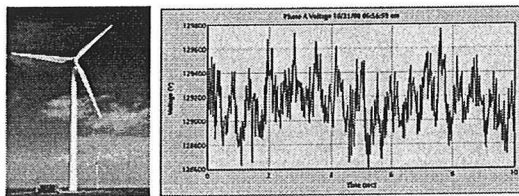


Fig1.Voltage of a wind turbine generator

Many solutions for solving the power quality problem including the fluctuation voltage have been researched in order to protect the loads which are connected into the system. The power flow control in a transmission line is an interesting solution. Recently, power electronic devices play an important role in the power quality solution. They make an efficient way to control the power flow. The complete topology is known as UPFC (Unified Power Flow Controller) which combines two sub-topologies, i.e. SSSC (Static Synchronous Series Compensator), STATCOM (Static Synchronous Compensator) [3] as shown in Fig.2. SSSC is connected in series and

STATCOM is connected in parallel into a system.

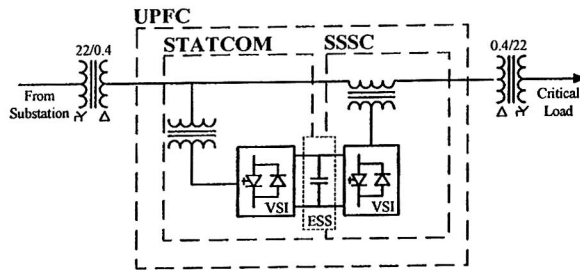


Fig.2 Power flow control topology

Fluctuation voltage could be solved by only a sub-topology; SSSC or STATCOM which each sub-topology has their advantage and disadvantage over the other. The interesting sub-topology in this research is STATCOM. It will be used to solve the fluctuation voltage of a wind turbine generator.

2. STATCOM

STATCOM is a device which connected in parallel into a system and could be varied both generating and drawing reactive power. Generally, STATCOM is used to regulate the AC voltage level at PCC. STATCOM is, furthermore, also used to maintain the stability of a system. A structure and installation of STATCOM into a system are shown in Fig.3. STATCOM consists mainly of VSI (Voltage Source Inverter) and has a DC capacitor which is a power source. VSI will be connected into a system via three interface reactors; L_c . By this method, VSI could be controlled as CSI (Current Source Inverter) in order to control power flow. R_c is defined as losses of the inverter. Mainly, STATCOM could exchange only reactive power with a system. In case of active power, it could not be exchanged by this structure due to small power source. STATCOM could, however, be modified in order to control both of reactive and active

power by changing the DC source such as battery instead of the existing DC capacitor.

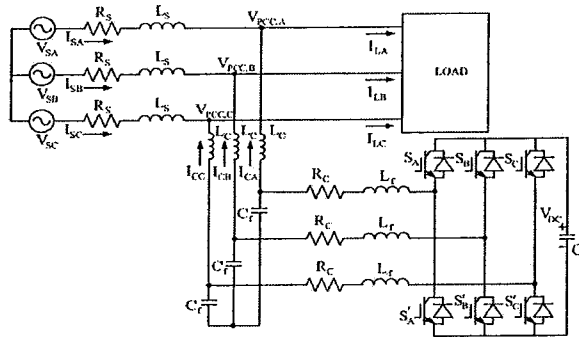


Fig.3 Structure and installation of STATCOM

3. Principle of operation

Fig.4 shows an operation diagram of STATCOM in this research. IPM is a power electronic module which is used as the inverter. The DSP (Digital Signal Processor) board is TMS320F2812.

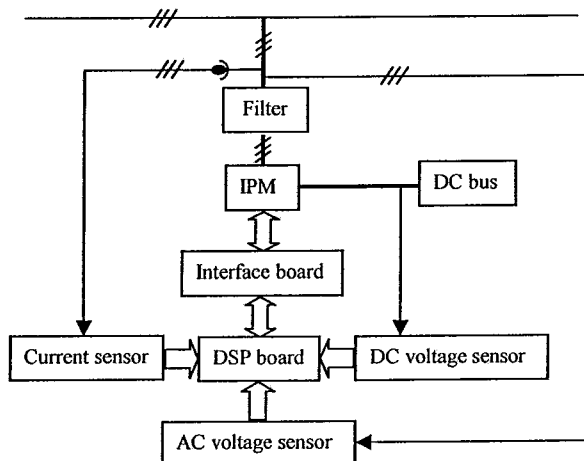


Fig.4 Diagram of STATCOM structure

The system voltage is measured and sent to the processor unit in order to detect voltage fluctuation and control the flow of reactive power for regulating the voltage. The fluctuation voltage will be detected on d-q axis or rotating referents

frame (RRF). Furthermore, the voltage signal will be improved by filtering which is called “recursive discrete Fourier transform or recursive DFT” [4], [5], [6]. The reactive power flow will be control via controlling the current of STATCOM which is injected via the power module and through passive low pass filter into the system. The principle control of the STATCOM according to the operation principle could be explained briefly as following.

3.1 dq detection method

The voltage detection method in this research is referred to the previous research [7] which detects a voltage vector on the rotating reference frame. The three phase voltage of a system will be transformed to a vector voltage on the stationary reference frame (SRF) according to equation (1). The vector on SRF consists of V_α and V_β . Next, it would be transformed to be the vector voltage on RRF which consists of V_d and V_q via equation (2). Fig.5 shows an example of d-q voltage component.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

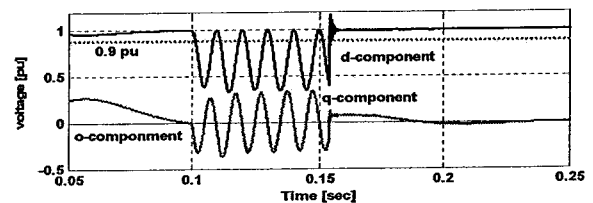


Fig.5 Signal of d-q voltage component

3.2 Recursive DFT

A voltage signal in a system might consist of the symmetrical components, harmonic components as well as some noise depending on each individual system. So the filtering process has to perform in order to eliminate the undesired signals. Recursive DFT (RDFT) which is a filtering method is applied in this research in order to obtain only the positive component of the voltage. RDFT could easily implement in the digital world and does not quite effect to the control. The voltage signal obtained from the d-q detection method on d-q axis rotates at fundamental frequency in positive direction. Therefore, the positive sequence which has the same frequency will become a DC signal on d-q axis. On the other hand, the undesired periodic signals, negative and zero sequence as well as all harmonics will still oscillate around the DC signal. This means that the DC signal, positive sequence, could be obtained easily by using the moving average filter as equation 3. The block diagram of RDFT is shown in Fig.6.

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad (3)$$

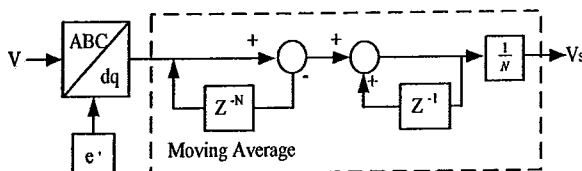


Fig.6 Recursive DFT Method

A simulation[8] of the RDFT with window length of 10ms is shown as Fig.7. The voltage of the simulation is modulated by some harmonics and its magnitude is modulated by 0.1pu., 15Hz sinusoid as shown in Fig.7a. The

fluctuation voltage starts at 0.1st second and end at 0.4th second.

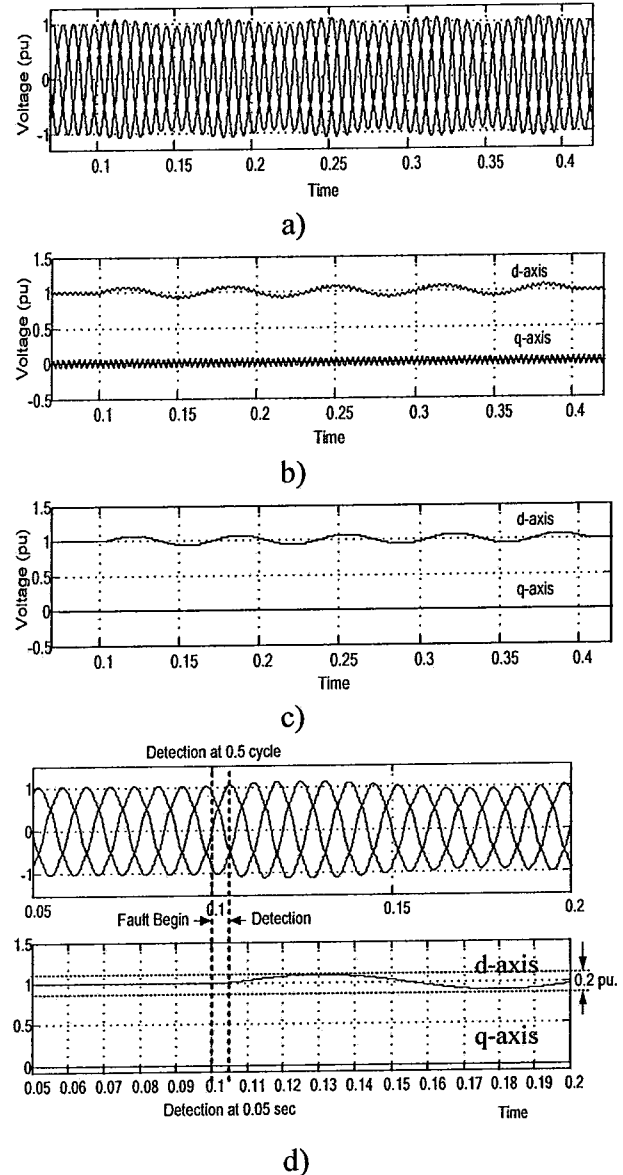


Fig.7 Simulation of fluctuation voltage detection

- a) Fluctuation voltage with harmonics
- b) d-q voltage c) d-q voltage by RDFT
- d) Delay time of the signal

Fig.8b shows the voltage on d-q axis which consists of the positive sequence and harmonics. Fig.8c shows the d-q voltage which is filtered by RDFT. The signal has only the positive sequence. This means that

the RDFT could eliminate the undesired signals which are harmonics in this case.

Fig.7 shows the result of delay time of RDFT that it could detect the magnitude change of the voltage at 0.105th second after the magnitude of the voltage started to increase at 0.1st second. This means that the method could detection the magnitude of voltage within 0.005 second or 0.4 cycle and it could detect the change of voltage magnitude between 0.9pu. and 1.1pu.. Therefore, the d-q detection method could be applied for detecting the voltage fluctuation in order to control STATCOM. Its accuracy and delay time, however, depends on the window length of the moving average filter and the frequency of voltage fluctuation.

3.3 Software

DSP is applied in this research in order to implement the algorithm of the principle control via C language. A flow chart of control software is illustrated in Fig.8.

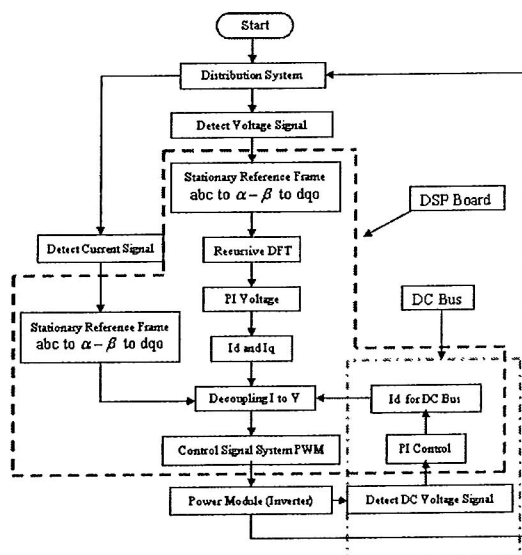


Fig.8 Flow chart of STATCOM software

After DSP received the system voltage signal, they will be transformed to d-q component and filtered by RDFT.

Next, the d component of the voltage is controlled by the current on q axis which will be injected into the system in order to control the reactive power flow via PI control. Finally, the q current signal will be converted to a voltage signal via Decoupling control to control VSI acting as CSI. At this state, the actual current on d-q axis is also required. For DC bus voltage control, the DC voltage is controlled by controlling the injected current on d axis in order to draw the active power from the system. Like the q current signal, the d current signal will also be sent to the Decoupling control.

4. Experimental setup and results

These experiments just show the possibility of the proposed algorithm that the voltage could be control. There are two cases of the experiments. First case is to connect the STATCOM into the low voltage system which is supplied from the electricity network. And the STATCOM is connected into the system which has a wind turbine as a power source. A target is to regulate the line to neutral voltage as 48V. Line impedance is 9mH. The results are shown as following.

4.1 Network with STATCOM

The STATCOM is connected into the network of the electricity authority through a three phase variac and there is a three phase resistive load; 400 W at 400V. Fig.9 shows the experimental setup.

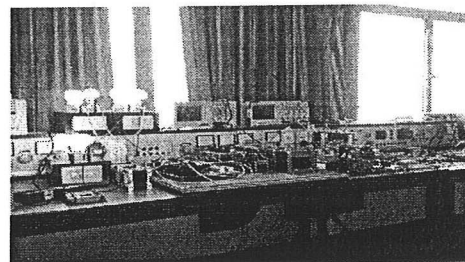


Fig9. Experimental setup for connecting the STATCOM to the network

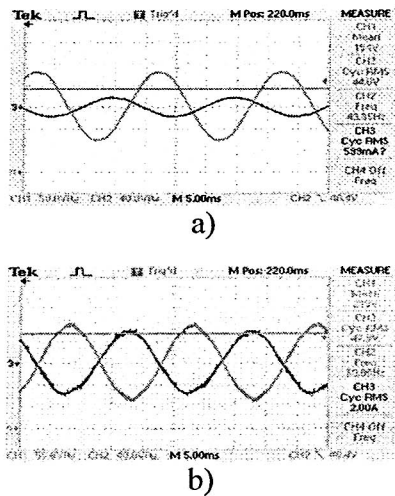


Fig.10 Voltage and current of the voltage regulation experiment when under voltage
a) before compensation
b) after compensation

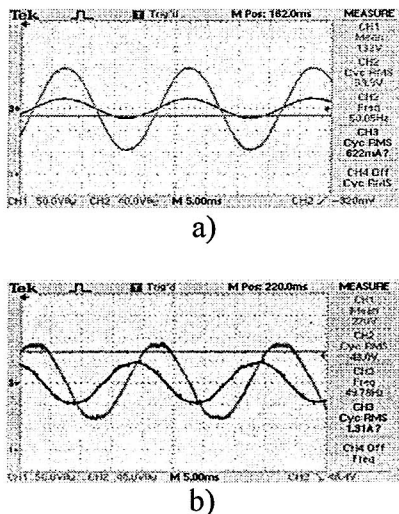


Fig.11 Voltage and current of the voltage regulation experiment when over voltage
a) before compensation
b) after compensation

Fig.10 shows the result of the voltage regulated by the STATCOM when the voltage is under 48V L-N. Fig.11 shows the result of the voltage regulated by the STATCOM when the voltage is over 48V L-N. The results

illustrate that the STATCOM could regulate the voltage as 48V.

4.2 Wind Turbine with STATCOM

The STATCOM is connected into the wind turbine system and there is a three phase resistive load; 400 W at 400V. Fig.12 shows the experimental setup.

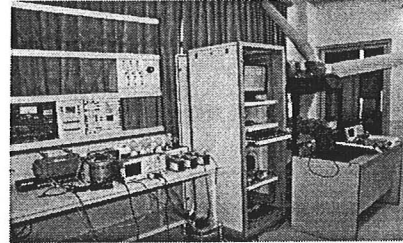


Fig.12. Experimental setup of the wind turbine system with the STATCOM

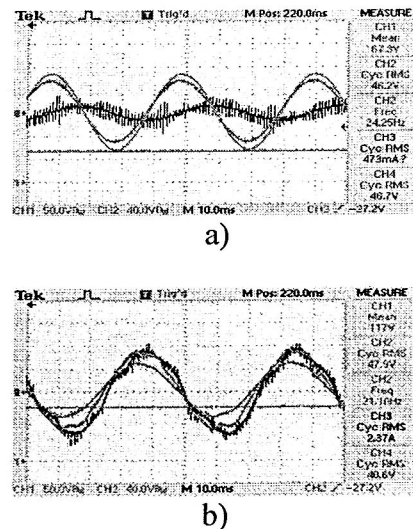


Fig.13 Voltage and current of the voltage improvement experiment of Wind Turbine
a) before compensation
b) after compensation

Fig.13 shows the result of the voltage improvement by the STATCOM when the voltage is under 48V L-N. The green signal is the voltage of the generator and the blue signal is the voltage of the load. The purple signal is the current in the system. The result illustrates that the STATCOM could improve the voltage to 48V.

5. Conclusions

This research illustrates that the STATCOM could regulate the voltage both of coming from the network and the wind turbine. The RDFT is applied to improve the d-q detection method to immunize the undesired signals. Moreover, it is very easy to implement in DSP; however, the response time and accuracy of the detector depends on the window length of the moving average filter and the frequency of voltage fluctuation. Although, the actual voltage fluctuation experiment is not performed but the possibility of the improvement of the fluctuation voltage is tested. The further aim of the research is to regulate the voltage to achieve the international standard; IEEE1159[9] in order that all loads which are connected into the system could work properly and be safer.

6. References

- [1] A. Ghosh and G. Ledwich, "*Power Quality enhancement using custom power devices*," London , pp.1-54 , 2002.
- [2] B.Aegilo, "*Power Quality*," John Wiley & Sons Ltd, England
- [3] N.G.Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS" *IEEE Trans. Power Engineering Society*, pp.1-29, 2000.
- [4] C.Kittiwat, "Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints" Thesis, Faculty of Engineering Chulalongkorn University , 2006.
- [5] Nakano et al., "Frequency Detection Method Based on Recursive DFT Algorithm," PSCC 14th, 24-28 June 2002, Sevilla .
- [6] I.Prachuab, "Improvement of voltage quality of a self-excited induction generator using an active filter "
- Thesis, Faculty of Engineering Chulalongkorn University ,2003.
- [7] S.Warunee et al., "Voltage sag detection method in power distribution systems for power quality issue" 32nd Congress on Science and Technology of Thailand conference ,19-21 Oct. 2006.
- [8] S.Warunee et al., "Voltage Detection and Voltage Implement at Different Frequency with Simple method for Compensator" 2nd EENET of Thailand conference ,5-6 Feb. 2010.
- [9] IEEE 1159 : 1995,IEEE *Recommended Practices on Monitoring Electric Power Quality*.

A Solid-State Device for Fault Protection in Low Voltage Wind Turbine System

Nattapong Phanthuna^{1*}, Napat Watjanatepin³, Wanida Pusorn², Warunee Srisongkram³
and Krischonme Bhumkittipich²

1) Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology (RMUT) Phra Nakhon

2) RMUT Thunyaburi , 3) RMUT Suvanabhumi

**Corresponding Author : pusorn_aa@hotmail.com*

Abstract

This paper presents how to design and build electrical protection equipment to apply for a wind turbine generator system which is modeled on low voltage 3 phase 380 volts system. This electrical equipment acts as a switch to open-close an electrical circuit to prevent an electrical system as well as equipments or devices in the system. It will open the circuit quickly and decrease the contact arcing of a circuit breaker. The implementation of power electronic properties is used instead of mechanical parts which is called "Solid-State Beaker". This article presents a method of solid-state breaker simulation on the mathematical analysis via MATLAB/ Simulink program in the cases of fault occurring in an electrical system. The simulation is used as a comparison when it is brought into the system. The fault voltage is detected by RMS Method which is implemented in LAB View program. The detection signal will be sent to the solid-state breaker and order it to cut off all three lines simultaneously to confirm the efficient running of solid- state breaker. But this paper has not yet considered the effect of Harmonic.

Key words: Solid State Circuit Breaker, IGBT

1. Introduction

From low voltage faults protection system study, when there is fault in the electrical system, protection equipment is required to decrease damage to the electric system and loads. The concept is applied to power generation systems from wind to protect a wind turbine generator. That act of cutting fault from electrical system must be fastest. Therefore, the protection equipment must be designed to be high-performance. The present circuit breaker tries to apply new technologies to get the property performance and the best protection in the electrical system. The study of the problem of the conventional circuit breaker caused to the concept of using power electronic device in a power system. Moreover, the study of power electronic devices is currently to have developed the capabilities of each device type to withstand higher voltage and current. We can use the properties of the semiconductor device which could conduct the current and stop the flow of the current in order to implement according to the conditions of a protection equipment in a system to create a reliable power protection and reduce the impact on electricity in case of voltage sag, voltage swell, surge, voltage interruption or noises that result in rapid voltage changes and voltage waveform distortion as well as effecting on consumers. Most of the electric loads in the present are sensitive to the occurrence of abnormal voltage caused damage to the equipment.

2. Short circuit current analysis of each fault

The occurrence of short circuit current is the condition which protection devices have to quickly interrupt a faulted system. [2]

1. Three Phase Fault is the three phase short circuit which is very difficult to happen in the distribution system. But if it happens, the short circuit current will be more serious than other faults as shown in Figure 1.

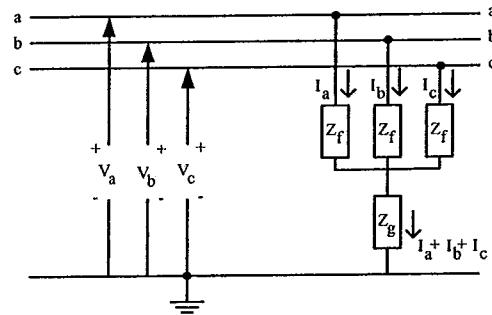


Figure 1: Three Phase Fault

Three phase fault can be found in the following equation:

$$I_a = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (1)$$

2. Line to Ground Fault is the simplest short circuit that could occur easily and may be caused due to lightning flash across the units of insulator or a conductor touching the structure on the ground as shown in Figure 2

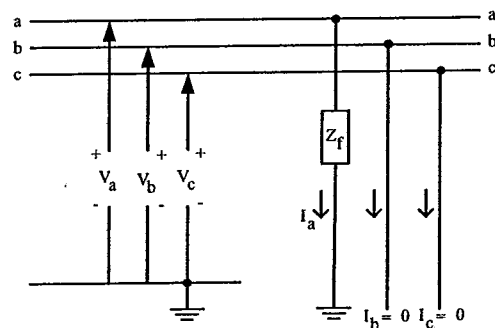


Figure 2: Line to Ground Fault

Line to Ground Fault can be found in the following equation:

$$I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (2)$$

3. Line to Line Fault is the short circuit between phase and phase. Figure.3 show an example of Line to Line Fault between phase b and c through the impedance between phase b and phase c shown in Figure 3

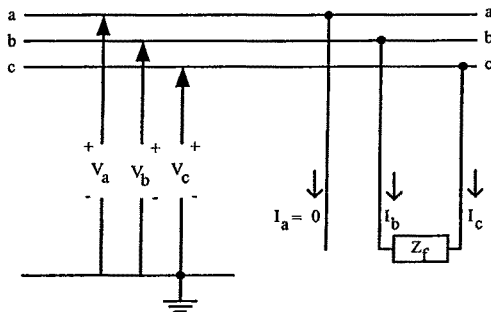


Figure 3: Line to Line Fault

Line to Line Fault can be found in the following equation:

$$I_a^1 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3)$$

4. Double Line to Ground Fault is the short circuit between phase b and phase c through the impedance to the ground as shown in figure 4

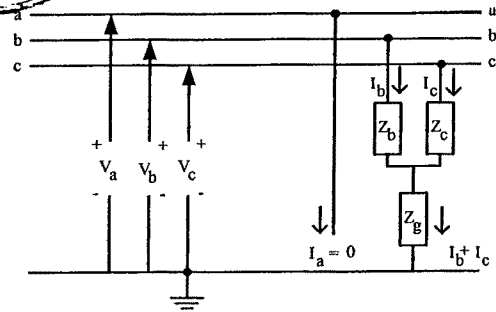


Figure 4: Double Line to Ground Fault

Double Line to Ground Fault can be found in the following equation:

$$I_{abc} = AI_a^{012} \quad (4)$$

The purpose of analyzing each fault and their violence is the basis to calculate fault current and fault analysis in order to determine the suitability of the associated equipment such as circuit breaker.

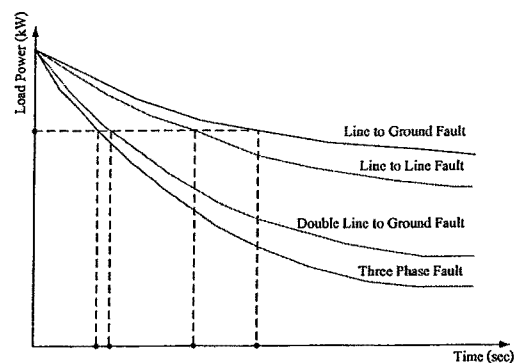


Figure 5: The stability of the system of each fault

Each individual fault will make the different change of system loading equal. Figure.5 show that the three phase fault will decrease the stability of electrical system more than single phase to ground fault. Thus, during the operation of protective equipment need to trip at higher speed. [3]

3. Comparison of a solid-state circuit breaker and the conventional circuit breaker

From study of circuit breakers to be foundation for designing power systems, it is important to know the main function of the circuit breaker which is to protect the over current situation arising from overload or short circuit conditions. The circuit breakers used in Thailand is referred to IEC 60898 standard. The circuit breaker according to this standard is used for the residential homes and buildings. according to that when the short circuit the current flowing through the circuit breakers in large amounts. If the amount of electricity that flows through is overcorrected instantaneous tripping of circuit breakers will cutting cycle is now within 0.1 seconds.

Table 2.3 IEEE Std 242-2001:
Estimated clearing times of protective devices.

Working conditions of circuit breakers	Current range size 225–600 A (AT)
Instantaneous, cycles	2–3
Short time, cycles	10–30
Long time, cycles	Over 100
Ground fault, cycles	10–30

4. Preliminary analysis

Basic properties of single phase equivalent circuit when fault happens is analyzed in an ideal case as shown in figure 6. During the fault time, the voltage drop across circuit breakers will be up and waveform of current decreases to be zero amp. [4]

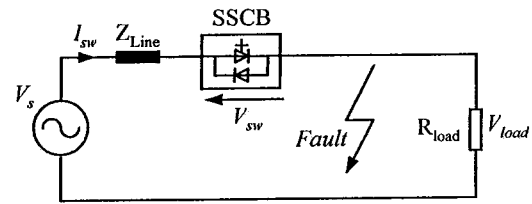


Figure 6: Equivalent circuit of solid-state circuit breakers

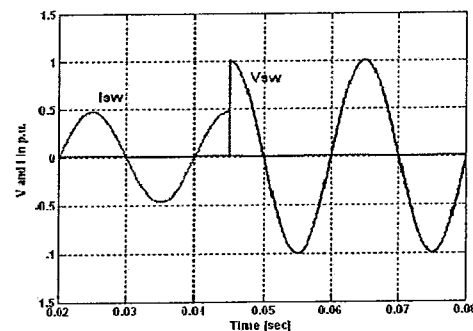


Figure 7: Ideal interruption simulation of solid-state circuit breaker

From the simulation of low voltage distribution system in Thailand nowadays, the equivalent circuit is shown in figure 8. The fault in the electrical system simulation starts at time of 0.2 seconds and its period is 0.05 seconds.

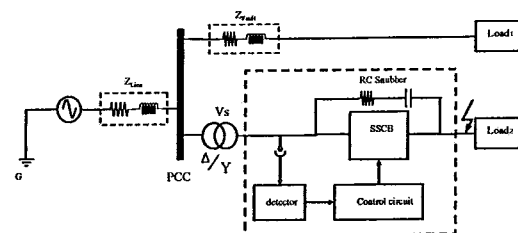


Figure 8: Simulation of a fault at downstream

Testing via MATLAB / Simulink program, voltage testing with low-voltage distribution system in per- unit starts at the beginning time to 0.05 seconds. It is found

that when the three phase fault occur in the system at 0.05 seconds to 0.25 seconds shows how to detect the RMS voltage after RMS voltage less than 0.9 p.u.

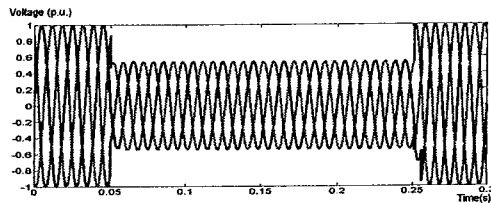


Figure 9: Three phase voltage when three phase fault is occurred

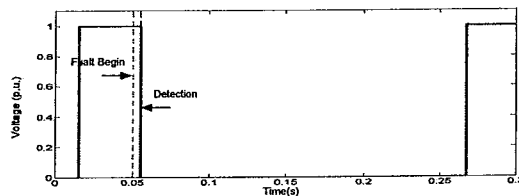


Figure 10: Simulation results for detecting voltage on the RMS value of voltage less than 0.9 p.u.

Testing via MATLAB / Simulink program, current experiment with low-voltage distribution system in per unit starts at the beginning time to 0.05 seconds. It is found that when the three phase fault occur in the system at 0.05 seconds to 0.25 seconds shows how to detect the RMS current after RMS current higher than 0.2 p.u.

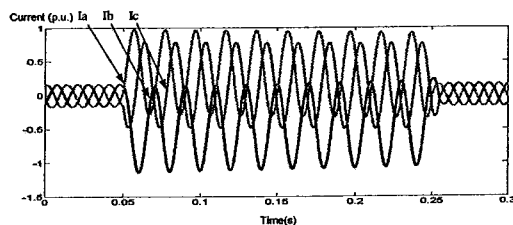


Figure 11: Three phase current when three phase fault is occurred

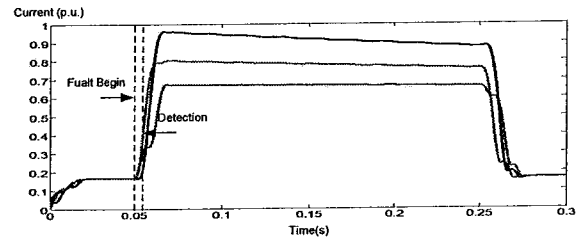


Figure 12: RMS current with the fault of phase a, b, c

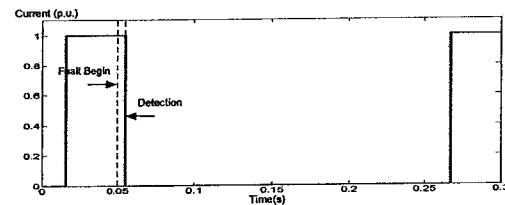


Figure 13: Signal from RMS current sensor when three phase fault is occurred

Operation condition of the circuit interruption will detect the short circuit current or over current of all three phase and use of fault detection by Root Mean Square (RMS) Method. It is found that the time of RMS measurement lower than 0.9 p.u. equals as 0.0543 seconds when fault at 0.05 seconds. [5]

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n^2} \quad (5)$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

4. Building technology

The basis of semiconductor with high-speed switching is brought and nowadays current rating of semiconductor is high. Figure14 shows an overview circuit design of solid-state circuit breakers including: -

- 2 IGBTs
- RC snubber

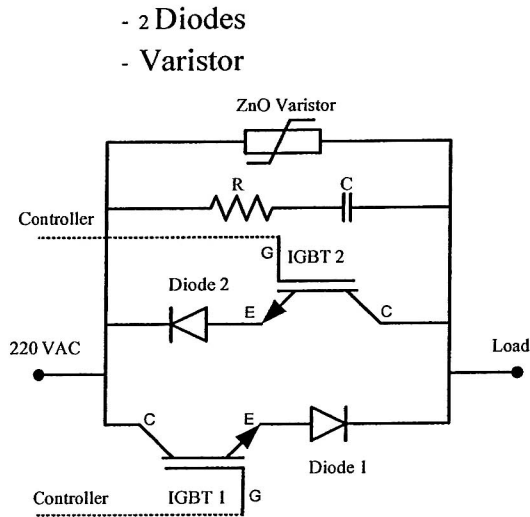


Figure 14: IGBT solid-state circuit breakers circuit

Fault detection by RMS Method, when voltage is lower than 0.9 p.u., short circuit current is higher than 0.3 p.u. sends signals to drive the gate of IGBT simultaneously to interrupt the circuit from the system. From the above principle, it can lead to design the voltage and current detection using Lab View program when there is fault in the system. Figure 14 shows a program which is written on the Lab View program, called "Visual Instrument (VI)". The appearance on a computer screen looks like a common measurement tool. Another section shows the block diagram for programming using the G-Programming (G Language) to write a program scheduled to run Lab View program and external devices to bring external data into computer using:

1. Analysis by measuring voltage and current through the CT, PT and processing
2. Use of automatic control systems by computer to create the

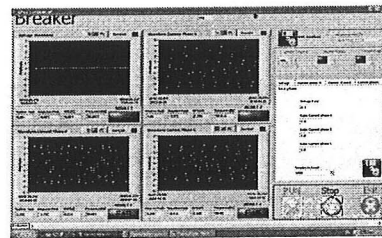
conditions on and off of the signal SSCB and send to the gate of the IGBT.

-Create virtual instrumentation for monitor the operating state of the system

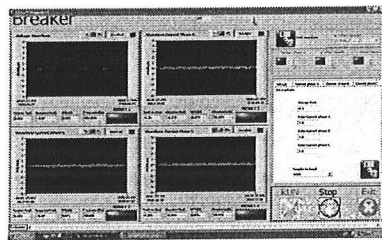
-Create Data Logger to collect data

The above operating conditions is used together to create SSCB and a virtual wave in the virtual instrumentation laboratory

Programming by connecting to the wind turbine system and the detection signal is checked by comparing to the scope.



Case 1: SSCB on the condition ON



Case 2: SSCB on the condition OFF

Figure 17: Show Instrumentation Lab View program of SSCB



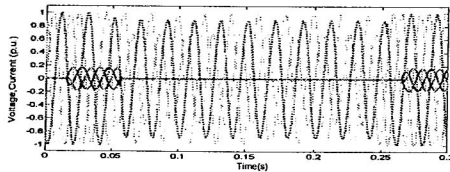
Figure 15: ON OFF test of the SSCB when connected to a Lab View program

5. Results

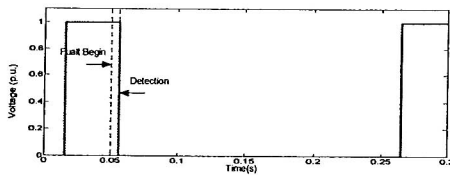
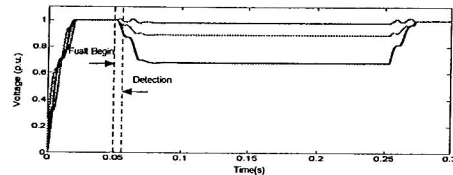
The result of using MATLAB / Simulink program, when fault for a phase to

ground on Phase A shows that 2 phase's voltage changes, the phase A and phase B but phase C has not changed

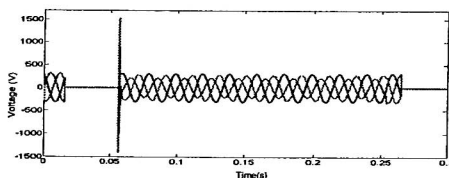
1. Fault case of one phase into the ground



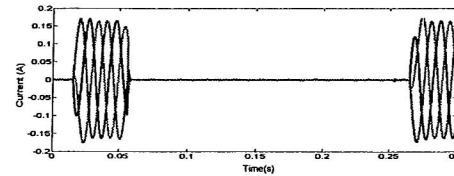
(a) Simulation results of voltage and current on the load when the solid state breaker opening-closing the circuit



(b) Simulation results of RMS voltage detection when the voltage is less than 0.9 p.u.



(c) Simulation results of the voltage when the solid state breaker opening-closing the circuit



(d) Simulation result of the current when the solid state breaker opening-closing the circuit

Figure 16: Simulation results of opening-closing the circuit of Solid-State circuit breakers in case of the phase to ground fault

Test results from the actual system when connected to wind turbine is compared between the Lab View program and the scope

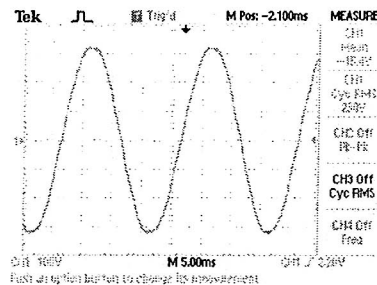
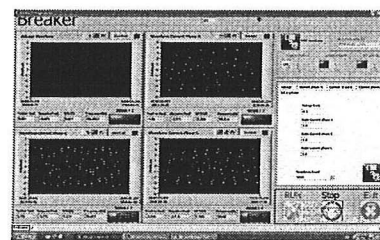


Figure 17: Test when normal system

Load voltage measurement shows that the voltage is 220 volts per phase, while the SSCB is not working

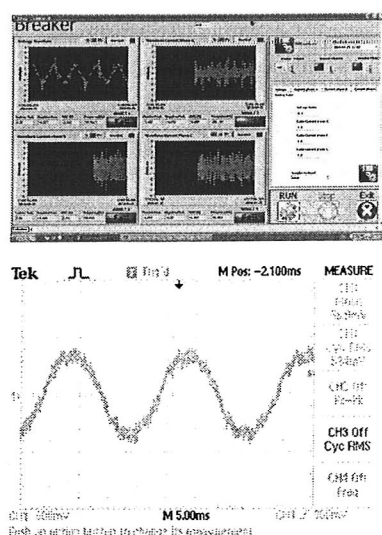


Figure 18: Test when SSCB cut the load off from the system

Load voltage measurement shows that the load voltage is approximately 0.5 volt.

5. Conclusions

The SSCB is implemented in this paper in order to test its performance and response time without the contact arc phenomenon. Operation states of the SSCB have the timing of switching on and off which are controlled by the signal from fault detector. Lab View program is applied to detect a fault condition in the system and send the ignition signal to the IGBT gate so as to stop the conduction of current. According to the analysis of the protection device, SSCB will interrupt the circuit immediately when there is some instant change of voltage. Both of symmetrical and asymmetrical faults could be detected by the RMS detection method. The fault signal will be used for controlling the SSCB to cut three phases off at the same time.

6. References

- [1] De Doncker, R. W.: "Recent Power Electronics Developments for FACTS and Customized Power", Korea Germany Advanced Power Electronics Symposium, 1998
- [2] Mladen Kezunovic : "Automated Monitoring and Analysis of Circuit Breaker Operation" Fellow, IEEE, Zhifang Ren,
- [3] Bergen, A.R. and Vittal, V., **Power Systems Analysis**. Prentice hall Inc , 2000, pp.90-100.
- [4] R. Teichmann TEICON Co, S. Bernet., "State-of-the-art Low Voltage and High Voltage IGBTs in Soft Switching Operation" pp.938-945
- [5] Lamoree et al., "Voltage Sag Analysis Case Studies" **IEEE Transactions on Industry Application**, Vol. 30, No. 4, July / August 1994. pp 1083-1089.
- [6] Tosato, F.: "Voltage Sags Mitigation on Distribution Utilities", ETEP Vol. 11, No. 1, January/February 2001

Development of Smart Monitoring System for Wind Energy System

Warunee Srisongkram^{1*}, Boonyang Plangklang², Chaiyant Boonme¹,
Krischonme Bhumkittipich², Nattapong Phanthuna³ and Wanida Pusorn²,

1) Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology (RMUT) Suwanabhumi

2) RMUT Thunyaburi, 3) RMUT Phra Nakhon

*Corresponding Author: Waruneesri@hotmail.com

Abstract

The paper presents a development of monitoring system for a prototype wind turbine system. The proposed monitoring system is developed under Labview environment. The system can connect to the wind turbine online via internet. The system will collect the monitored values and install values into memory. Simultaneously, the system can show the values in Real-Time. The operator can observe the wind turbine by the monitoring system and can take an action on time if the wind turbine is not working properly. The results of the monitoring system indicate that the monitoring system is able to working properly, the data can be used to investigate the wind turbine for system analysis. This is very important for wind turbine in order to supply energy to consumer stably.

Keywords: Wind Turbine, Monitoring system

1. Introduction

Renewable energy sources such as solar energy, wind energy provide realistic alternatives for electrification especially in remote area. One of the most promising applications of renewable energy technology is the wind energy system. As the wind turbine system is increasingly used, thus, it has to be a technically reliable energy system to the consumer. To keep the wind system working reliably, it is necessary to have a monitoring system to continuously monitor the wind system. The goals of monitoring are normally to:

- Ensure that the system is operating properly
- Assess the performance of system components, pinpoint faulty devices
- Permit the calibration of tools
- Reveal improvements to the design and increase the understanding of the designer

In most monitoring systems, the information is collected from the remote station to master station. Commonly systems in such rural areas are supervised by yearly visits in conjunction with a data logger. But this method leads to the inefficiency of response time for maintenance as well as the product improvements is poor. There are already some monitoring systems have been presented such as SCADA (Supervision Control and Data Acquisition). However, the known problems for those methods are: high investment cost, need special software for Client stations, and difficulty with communication link. These all disadvantages make the hybrid system ineffective in economic performance. Thus, to fulfil remote monitoring requirements, a suitable monitoring system for the wind energy system has to be developed.

2. Concept of propose monitoring system

The concept of proposed mentoring system is combined to the wind turbine prototype. The developed wind turbine prototype is included a power quality control unit, a converter, and simulation load. The monitoring system will be integrated to the prototype as shown in Fig. 1.

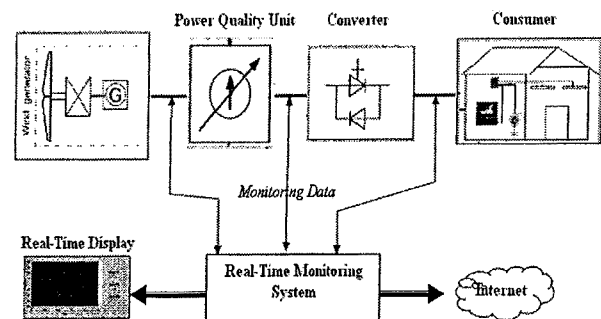


Fig. 1: The proposed monitoring system and the developed wind turbine system.

From Fig.1, the monitoring system will be connected to three points: wind turbine, PQ unit, and the converter which is the output supply of the wind energy system. All monitored data will be stored in the monitoring memory. Operators can access the data at the monitoring system as well as operator can observe the wind turbine by a visual display in Real-Time. Moreover the monitoring system can provide the monitored data to internet via communication link over a TCP/IP network or wireless network.

There is no need for any special software for viewing the system. The proposed monitoring system is composed of a monitoring unit (sensor unit), a data acquisition unit, and a communication unit. The data acquisition unit will collect the monitored data from the sensor unit and then stores the monitored data into its memory. After the determination of monitoring system, the

system can be developed accordingly to the design.

3. Develop of the system

Data monitoring software is written by Labview programming tool.

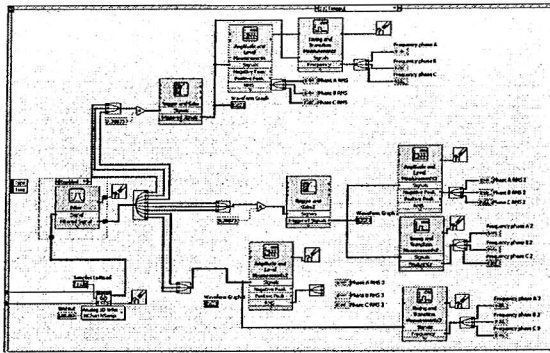


Fig.2 Circuit of data monitoring in Labview program.

The monitoring unit must be able to work with the developed hardware compatibly. Fig.3 shows the development of whole prototype wind system including monitoring system.

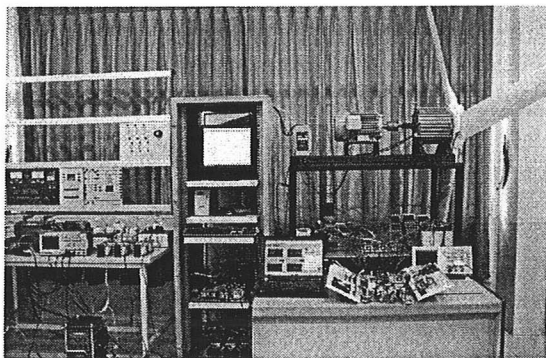


Fig 3: Developed prototype wind system including monitoring system

The prototype wind system as shown in Fig.3 is developed according to the design diagram in Fig.1. The wind speed simulator unit will simulate the wind situation and drive the generator accordingly to wind speed profile from operator. The PQ unit will control the power quality of wind turbine by using STATCOM configuration. The power from wind energy system will be connected to the developed converter

then supply to simulation load. The monitoring system is a key of whole system. All parameters will be observed by the monitoring system. The operator can analyze and investigate the wind energy system via the monitoring system. Therefore, the monitoring system must work properly and provide real-time data to the operator.

4. Implementation

The implementation of the system is simulated by a selected wind profile. After inputting the wind profile to the generator, the PQ unit will control the quality of the power and supply to load via converter. The monitoring system provides the visual display which can immediately observe the power quality of the system. The monitoring system provides very useful graphic windows for the operator. The graph will show at the point of monitoring. The operator can just open the program then the data will be immediately displayed. The feature of monitoring system is shown in Fig.4.

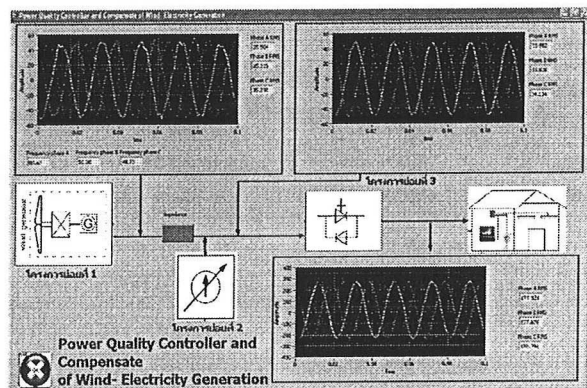


Figure 4. The monitoring system display

Fig.4 shows the test of the monitoring. The data analysis can be started as soon as the operator runs the wind system via real-time display. The operator can also point out at the values which want to investigate by clicking to the area of monitoring then the graph will be displayed as show in Fig. 5. The

monitored data are also stored to the main station. Data analysis can be done on a routine basis, for example once a day or a week. This will help the operator to make sure that the system is working properly and when problems occur, the operators can enable an immediate action to the system at the right time.

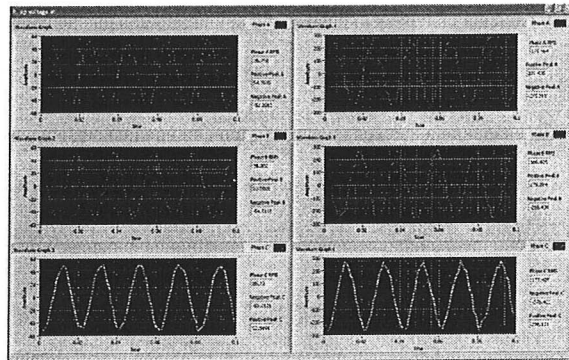


Fig.5. Display of real-time monitoring investigation

As mentioned, the monitored data, which is stored can be comfortably implemented with several programs such as Excel program tool. The operator can download the monitored data from the main station both directly and wirelessly. The monitoring system provides a communication link. The operator can access the data via internet, the operator need only a password to enter the download area. This is very useful for remote monitoring.

From the implantation as shown in Fig. 4,5 the results show that the wind prototype is working properly and the monitoring system can provide the correct data, the operator can investigate the characteristic of the system in order to analyze and for future applications.

5. Conclusions

The paper implemented the real-time internet web based technology for monitoring of wind energy system. The concept of the proposed monitoring system is that the monitored data is

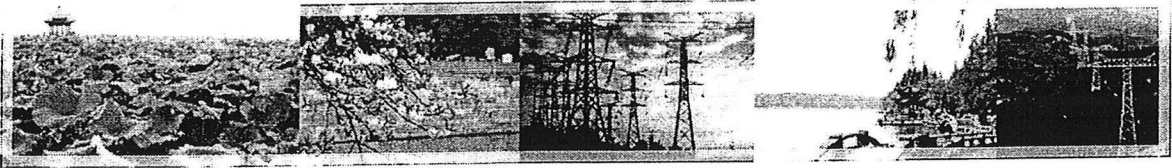


stored into main memory at the site. The operators can access the monitored data directly or via internet. The monitoring system allows the operator to download the monitored data via internet. While at the station, the operator can observe the system as real-time via graphic display. The investigation can be done on time at the station. Moreover, the operator can collect the monitored data for future investigation. From the experiment, the results illustrate that the developed Labview based monitoring system shows itself to be a very suitable solution for wind energy monitoring system.

6. Acknowledgements

The authors are grateful to the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology (RMUT) Suvanabhumi (RMUTSB), Thanyaburi (RMUTT) and Phra Nakhon (RMUTP), for the support in conducting this study. Thanks friends for the helpful exchange of information.

References

- [1] B. Plangklang, An Embedded Interactive Monitoring System for PV-Diesel Hybrid Plants in rural areas, EECON28, Phuket, Thailand, 2005.
- [2] D. Thevenard, M. Ross, and G. Howell, A checklist for PV system monitoring, Numerical Logics Inc. Waterloo, Ont. Canada 1998-15.
- [3] S. Krauter, T. Depping, Monitoring of Remote PV-Systems by Satellite, conference PV in Europe, 7-11 Oct. 2002, Rome Italy.
- [4] Schmid J., Photovoltaic Systems Technology, Teaching Script, IEE-RE, University of Kassel, Germany (2002).
- [5] Ketjoy N., Photovoltaic-Diesel Generator Hybrid System at the Energy Park, Naresuan University, Thailand (2001)
- [6] B. Plangklang et al., Control Strategies for PV Hybrid System, EU-PVSEC 2009, Hamburg, Germany, 2009

[Home](#)[Introduction](#)[Call For Papers](#)[Committees](#)[Accommodation and](#)[Venue](#)
[Transportation](#)[Schedule](#)[Keynote & Panel](#)[Cultural Night](#)[General Information](#)[Registration](#)[About Hangzhou](#)[Contact Us](#)**Call For Papers** [论文集集.pdf](#) [call for papers.pdf](#)**Welcome to POWERCON2010**

POWERCON2010, the seventh in the series, will mainly provide a large forum for the practicing engineers, scholars, researchers and graduate students to meet together to discuss various issues and share the latest developments in electric power engineering and power system technology. The theme of this conference is "Technological Innovations Making Power Grid Smarter". The constant changes to the electricity supply industry, the constraint of practicality and limited storage require smart solutions to fuel the rapid advancement of power systems. Therefore, the conference will focus not only on traditional power system issues but also new challenges facing us resulted from such as distributed generation, renewable generation and its integration into power systems, UHV transmission, wide area interconnections, development of smart grid, energy storage, energy saving and emission reduction.

Main Topics

1. Bulk Power Transmission and Backbone Grid
 - 1.1 Transmission Planning in the Market Environment and Renewable Energy Integration
 - 1.2 UHVAC and UHVDC Power Transmission
 - 1.3 Power System Simulation and Modeling
 - 1.4 Power System Protection, Control and Operation
 - 1.5 Solutions to Prevent System Blackout and Voltage Collapse
2. Wind and Solar Power Generation Development
 - 2.1 Development of Large Scale Wind and Solar Power Generation
 - 2.2 Necessary Grid Infrastructure for Accommodating Large Scale Renewable Power Generation
 - 2.3 Integration of Small and Medium Sized Wind and Solar Power Generation
 - 2.4 Grid Operational Challenges with Increased Variability and Uncertainty and Solutions
 - 2.5 Other Renewable Energy Source Development
3. Development of Smart Grid Technology
 - 3.1 Objectives, Benefits and the Road Map of Smart Grid Implementation
 - 3.2 WAMS Application
 - 3.3 Cyber Security & Structure of the Communication System
 - 3.4 Standards
 - 3.5 Advanced Metering Infrastructure and Home Area Networks
 - 3.6 DSM and Application of Demand Response
 - 3.7 Smart Dispatching, Security Analysis and Supervisory Control of Power Grid
 - 3.8 Smart Substations and Equipment
 - 3.9 Maintenance and Asset Management
4. Power Electronics (PE)
 - 4.1 Application of PE in the Interface Between Renewable Generation and Power System
 - 4.2 VSC Based HVDC
 - 4.3 New Development of FACTS
 - 4.4 FACTS Technology Applied in Power Distribution System
 - 4.5 PE Valve Testing
 - 4.6 PQ Improvement
5. Equipment and Technology in Transmission and Distribution Engineering
 - 5.1 Insulation Technology
 - 5.2 Disaster Prevention and Control
 - 5.3 Diagnosis Technology, Life Assessment, Condition Monitoring and Maintenance of Equipment
 - 5.4 Automation Technology
6. Emerging Technology Development
 - 6.1 Micro-Grid and Distributed Generation
 - 6.2 Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Their Impact on System
 - 6.3 Energy Storage
 - 6.4 Nanotechnology
 - 6.5 Efficient Energy Use
 - 6.6 Superconductivity Application in Power System

Summary of Important Dates

- | | |
|--|----------------|
| -Deadline of Abstract Submission | March 1, 2010 |
| -Notification of Abstract Acceptance | April 15, 2010 |
| -Deadline of Full Paper Submission | June 15, 2010 |
| -Notification of Full Paper Acceptance | August 1, 2010 |

Distributed STATCOM for controlling Voltage of Wind Turbine Generator

W. Srisongkram, N. Phanthuna, K. Bhumkittipich *Member, IEEE*, W. Pusorn and K. Chiangchin

Abstract-- This paper describes analysis and control design of a distribution level static synchronous compensator (DSTATCOM) to control the voltage at the PCC in order to keep the power constant at the load from intermittent wind speeds. For fast response requirement, a feedforward compensation scheme is derived and employed in the paper. Firstly, the mathematical model of the DSTATCOM is derived. Then the compensation principle is described with applying RDFT in order to immune any undesired signals. Accordingly, a hardware prototype is built with a fix-point DSP TMS320F2812-based system. Use of a current-controlled PWM inverter as the power stage of the DSTATCOM generates needed compensation currents for real-time load compensation. Finally, experimental results confirm the performance of the proposed DSTATCOM.

Index Terms-- DSTATCOM, Distribution Line, Wind Turbine

I. INTRODUCTION

Recently, Thailand recognizes the importance of using more renewable energy like many countries which are developing renewable energy work more currently. Wind energy is not only free but it is also clean. Wind turbines were established in many areas of Thailand with a capacity from 1 kW up to 2 MW. Due to the climate of Thailand which is tropical country, it affects the wind speed and volume to be not stable. Sometimes the speed only 1m/s but sometimes is 14 m/s. Voltage from wind turbine is, therefore, not good enough to connect to the grid of the network as shown in Figure 1 which is the problem for electronic devices.

Many solutions for solving the power quality problem including the fluctuation voltage have been researched in order to protect the loads which are connected into the system.[1] The power flow control in a transmission line is an interesting

solution. Recently, power electronic devices play an important role in the power quality solution.[2] They make an efficient

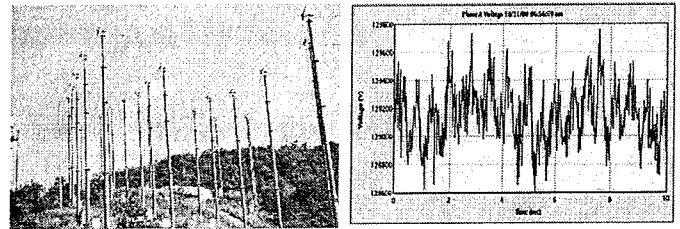


Fig. 1. Wind turbine generator at Koh Lan Island in Thailand

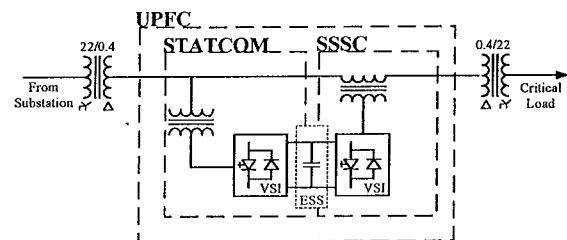


Fig. 2. Power flow control topology

way to control the power flow. The complete topology is known as UPFC (Unified Power Flow Controller) which combines two sub-topologies, i.e. SSSC (Static Synchronous Series Compensator), STATCOM (Static Synchronous Compensator) [3] as shown in Fig.2 SSSC is connected in series and STATCOM is connected in parallel into a system.

Fluctuation voltage could be solved by only a sub-topology; SSSC or STATCOM which each sub-topology has their advantage and disadvantage over the other. The interesting sub-topology in this research is Dstatcom. It will be used to solve the fluctuation voltage of a wind turbine generator. The principle, analysis and implementation of the Dstatcom are described. Finally, the experiment of the Dstatcom is performed by connecting it with a wind turbine; 1 kW, 48V in order to test its performance regarding voltage regulation at various voltages.

II. MATHEMATICAL MODEL OF DSTATCOM

The STATCOM and the sensitive load are connected at PCC as shown in Fig. 3. To analysis the system, we have to assume the fluctuation voltage and STATCOM to be ideal. So, the equivalent circuit of STATCOM can be written as shown on Fig.4. The output voltage of voltage source inverter is defined as V_{inv} . The resistor and inductor filter are defined as

W. Srisongkram is with Electrical Engineering Field of Study, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvanabhumi, Nonthaburi Center, Nonthaburi, Thailand (e-mail: waruneesri@rmutsb.ac.th)

N. Phanthuna is with Electrical Engineering Field of Study, The Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phar Na khon, Bangkok, Thailand (e-mail: nattapong100@gmail.com)

K. Bhumkittipich is with Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand (e-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th)

W. Pusorn is with Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand

K. Chiangchin is with ABB-Thailand Company Limited, Bangpoo, Samutprakarn, Thailand, (e-mail: Kittiwat.Chiangchin@th.abb.com)

R_f and L_f , respectively. The grid voltage, V_{grid} , is the voltage at

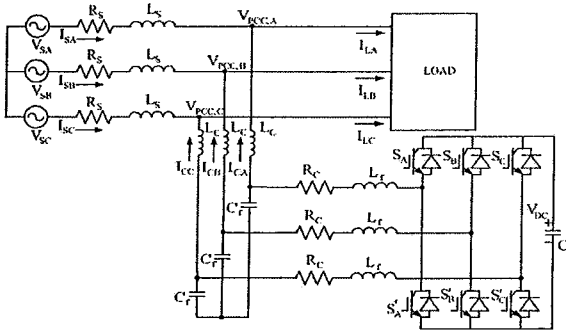


Fig. 3. Shunt connection of the STATCOM to the distribution line.

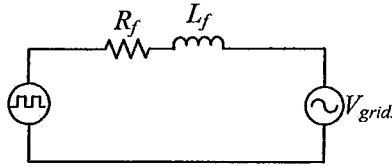


Fig. 4. Equivalent circuit of shunt-compensator.

PCC. On Fig. 3 can also transfer to algebraic equation as shown in equation (1) to (11) for creating the STATCOM mathematical model. The model is defined from the stationary to synchronous reference frame [4].

when V_{inv} is inverter voltage

V_{grid} is voltage in power system and voltage at PCC

$$L \frac{di}{dt} + R_f \cdot i = V_{inv} - V_g \quad (1)$$

Stationary reference frame to synchronous reference frame

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

From Equation (1) can be transferred dq axis model by using Park's Transformation in equation (2) to (3).

$$\begin{aligned} L_f \left[\frac{d}{dt} (i_d + j i_q) + j \omega (i_d + j i_q) \right] + R_f (i_d + j i_q) \\ = (V_{inv} v_d + j V_{inv} v_q) - (V_g d + j V_g q) \end{aligned} \quad (4)$$

Then separated equation (4) can be algebraic equation of dq-axis; d-axis as shown equation (5), q-axis in equation (6).

$$L_f \frac{d}{dt} i_d - L_f \omega \cdot i_q + R_f \cdot i_d = V_{inv} v_d - V_g d \quad (5)$$

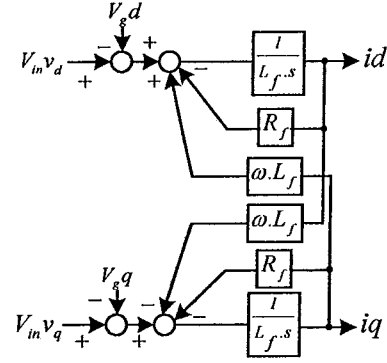


Fig. 6. Mathematical Model of STATCOM

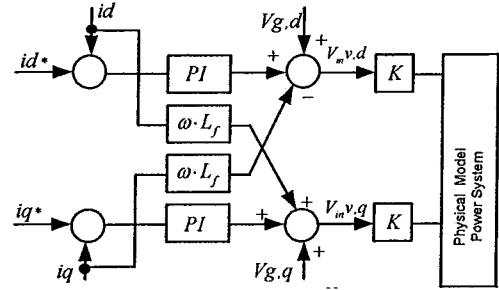


Fig. 7. Mathematical model of decoupling control.

$$L_f \frac{d}{dt} i_q - L_f \omega \cdot i_d + R_f \cdot i_q = V_{inv} v_q - V_g q \quad (6)$$

Fine current in dq0-axis from equation (2) to (4) as shown equation (7) and (8)

$$i_d = \frac{1}{L_f \cdot s} [V_{inv} v_d - V_g d + L_f \omega \cdot i_q - R_f \cdot i_d] \quad (7)$$

$$i_q = \frac{1}{L_f \cdot s} [V_{inv} v_q - V_g q + L_f \omega \cdot i_d - R_f \cdot i_q] \quad (8)$$

And equation (7)-(8) can be model in the block diagram as shown in Figure 6.

The objective is to produce a sinusoidal ac output whose magnitude and frequency can be controlled. The decoupling control has been implemented in the synchronous reference frame because the synchronous frame controller can eliminate steady state error and has fast transient response Cross-coupling on d and q components are shown in Fig. 7.[5]

The feed-forward component as shown in Fig.7 is the scheme that is used to eliminate the initiate sample value. The PI regulators, namely K_p and K_i [5], are designed to keep the stability margin of the entire system by getting the eigen values on the left hand side of the S-plane. The DC-Link voltage must be controlled to keep the constant DC voltage that used for generating the desired voltage component of shunt compensator.

III. COMPENSATION PRINCIPLE OF DSTATCOM

Figure 8 shows the configuration of the Dstatcom which consists of a three phase voltage source converter (VSC), a DC capacitor C_{bus} and an interface inductor on the ac-side. A low pass filter which consists of a capacitor C_f , an inductor L_f and a damping resistor R_f is added to the ac-side of VSC. The reactive power output of the DSTATCOM in each phase, which is inductive or capacitive, can be independently controlled by the controller of the DSTATCOM for real-time load compensation. For fast real-time compensation, the DSTATCOM needs to detect the line-to-line voltage data very quickly to calculate the needed compensation current. So the dq detection method with RDFT [6],[7] is applied. By this way, any undesired signals such as harmonics are reduced. Moreover, this method can be implemented very easily by a high performance DSP-based system

After DSP received the system voltage signal, they will be transformed to d-q component[8] and filtered by RDFT. Next, the d component of the voltage is controlled by the current on q axis which will be injected into the system in order to control the reactive power flow via PI control. For DC bus voltage control, the DC voltage is controlled by controlling the injected current on d axis in order to draw the active power from the system. Combining the above two currents generates the needed d and q current command signals for the DSTATCOM. Finally, the d and q current signals is converted to a voltage signal via Decoupling control which is shown in Fig.7 in order to control VSI acting as CSI. At this state, the actual current on d-q axis is also required.

IV. HARDWARE IMPLEMENTATION

The compensation principle is implemented by using a fix-point DSP TMS320F2812-based system. The execution program of the controller is firstly developed in the host computer with a mixed form of C language and assembly language. Then the completed execution file is downloaded to the target DSP via a data link. A sample rate is 10 kHz. The execution time is fast enough for the real-time control of the DSTATCOM. Block diagram of control software is illustrated in Fig.9.

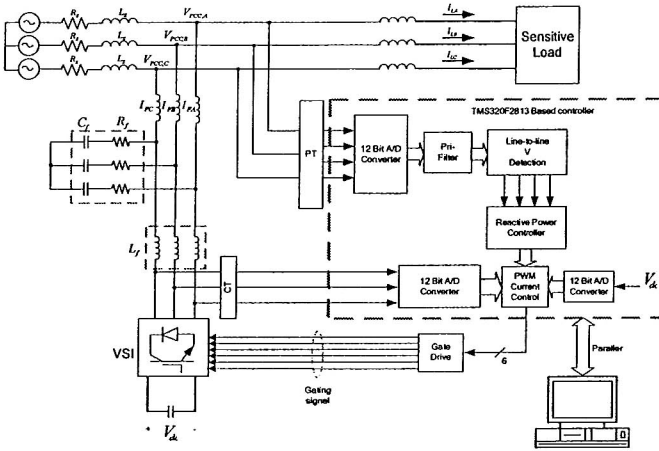


Fig. 8. Overall schematic diagram of proposed Dstatcom

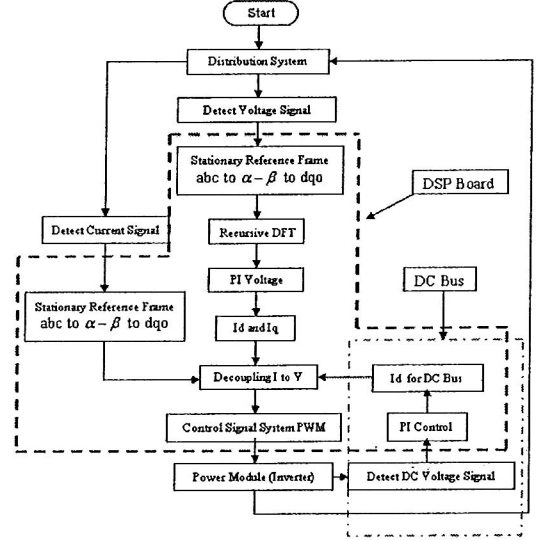


Fig. 9 shows the block diagram for the hardware

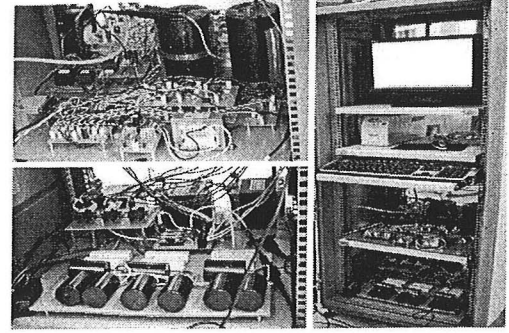


Fig.10. Hardware prototype of the proposed DSTATCOM.

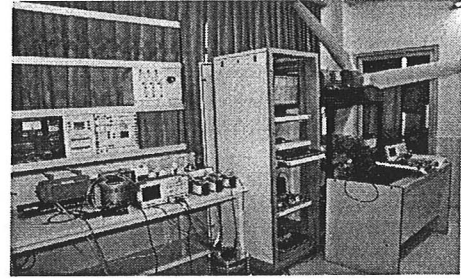


Fig.11. Experimental setup of the wind turbine system with the Dstatcom

The circuit parameters of the Dstatcom in Fig. 8 are $C_f=10 \mu F$, $R_f = 23.5 \text{ ohm}$, $L_f = 4 \text{ mH}$ and $C_{bus} = 5,000 \mu F$. An Intelligent power module (IPM) is employed for the power stage of the Dstatcom. The switching frequency of the inverter is 10 kHz.

V. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

The experiments setup is shown in Fig.11. The Dstatcom is connected into the wind turbine system which there is a three phase resistive load. A target is to regulate the line to line voltage as 48V. The system parameters are shown in Table I.

Table II shows results of the voltage improvement by the Dstatcom when the voltage is under 48V L-L. V_s is the line-to-



line voltage at the terminal of the wind turbine. Table II shows results of the voltage improvement by the STATCOM when the voltage is over 48V L-L. The results illustrate that the STATCOM could regulate the voltage at 48V.

TABLE I
SYSTEM PARAMETERS FOR EXPERIMENT

System Quantities	Values
System Voltage Level	48 V
Load	400 W at 400V
Line impedance	9 mH
DC-bus Voltage	200 V

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULTS OF 48V REGULATION FOR UNDER-VOLTAGE.

$V_s(V_{rms})$	$V_{PCC}(V_{rms})$	$I(A_{rms})$	$V_{dc}(V_{avg})$	$f(Hz)$
28	47.8	7.56	200	16.23
29	47.8	7.10	200	16.54
30	47.9	6.79	200	16.98
31	47.8	6.38	200	17.19
32	47.9	5.98	200	17.64
33	47.8	5.56	200	18.05
34	47.9	5.12	200	18.41
35	48.1	4.78	200	18.89
36	48.2	4.29	200	19.22
37	47.8	4.01	200	19.68
38	47.9	3.72	200	20.01
39	47.8	3.16	200	20.11
40	47.9	2.61	200	20.39
41	48	2.25	200	20.85
42	47.8	1.78	200	21.12
43	47.8	1.22	200	21.39
44	47.8	0.58	200	21.85
45	48.2	0.42	200	22.58
46	47.8	0.32	200	23.49
47	47.8	0.30	200	24.05
48	47.8	0.28	200	24.81

TABLE III
EXPERIMENTAL RESULTS OF 48V REGULATION FOR OVER-VOLTAGE.

$V_s(V_{rms})$	$V_{PCC}(V_{rms})$	$I(A_{rms})$	$V_{dc}(V_{avg})$	$f(Hz)$
48	47.8	0.28	200	24.81
49	47.9	0.34	200	25.25
50	47.8	0.38	200	25.69
51	47.8	0.45	200	25.98
52	47.8	0.67	200	26.41
53	48.1	1.25	200	26.87
54	48	1.85	200	27.23
55	47.9	2.31	200	27.65
56	47.9	2.69	200	27.99
57	47.8	3.21	200	28.35
58	47.8	3.79	200	28.89
59	47.8	4.20	200	29.31
60	47.9	4.68	200	29.75
61	47.9	5.21	200	30.12
62	48.1	5.64	200	30.58
63	48.2	6.09	200	30.89
64	48.1	6.48	200	31.23
65	48.2	6.81	200	31.65
66	48.1	7.29	200	32.06
67	48.1	7.50	200	32.49
68	48.1	7.85	200	32.95

VI. CONCLUSIONS

This research illustrates that the STATCOM could regulate the voltage coming from the network the wind turbine. The d-q detection with RDFT is applied to detect system voltage quickly and could immune any undesired signals. Moreover, it is very easy to implement in DSP; however, the response time and accuracy of the detector depends on the window length of the moving average filter and the frequency of voltage fluctuation. The further aim of the research is to solve the fluctuation voltage in a wind farm.

VII. ACKNOWLEDGMENT

The another is grateful to Office of the National Research Council of Thailand (NRCT) . For the research budgets, and thanks researcher of the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology(RMUT) Suvanabhumi (RMUTSB), Thanyaburi (RMUTT)and Phra Nakhon (RMUTP) for collaborate to research.

VIII. REFERENCES

- [1] A. Ghosh and G. Ledwich, "Power Quality enhancement using custom power devices," London , pp.1-54 , 2002.
- [2] B.Aegilo, "Power Quality," John Wiley & Sons Ltd, England
- [3] N.G.Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS" *IEEE Trans. Power Engineering Society*, pp. 1-29, 2000.
- [4] C.Kittiwat, " Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints" Thesis, Faculty of Engineering Chulalongkorn University , 2006.
- [5] I.Prachuab, "Improvement of voltage quality of a self-excited induction generator using an active filter " Thesis, Faculty of Engineering Chulalongkorn University ,2003.
- [6] Nakano et al., "Frequency Detection Method Based on Recursive DFT Algorithm," PSCC 14th, 24-28 June 2002, Sevilla .
- [7] S.Warunee et al., "Voltage Detection and Voltage Implement at Different Frequency with Simple method for Compensator" 2nd EENET of Thailand conference ,5-6 Feb. 2010.
- [8] S.Warunee et al., "Voltage sag detection method in power distribution systems for power quality issue" 32nd Congress on Science and Technology of Thailand conference ,19-21 Oct. 2006.

