

ตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการจีเนติกสำหรับดี-สแตตคอม

Optimal PI Controller using Genetic Algorithm for D-STATCOM

ขุนแผน ปฎิมาประกร² อภินันท์ อรุโณภณ¹ และวรวัดน์ เสงี่ยมวิบูล¹

Received: April, 2015; Accepted: June, 2015

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองและการออกแบบตัวควบคุมของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส เนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน แบบจำลองที่ทำได้ถูกใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแสและชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการการควบคุมแบบฮิลเตอร์รีซิส ในขณะที่ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอ โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัส การออกแบบใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอทำงานร่วมกับตัวชดเชยเฟสนำหน้าและล่าหลัง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกค้นหาด้วยวิธีการจีเนติก ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสองบัส ระบบที่นำเสนอถูกจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลของการจำลองแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ดี-สแตตคอม และชุดควบคุมที่ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส อันเนื่องมาจากเกิดแรงดันตกและเกินได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 0.01 วินาที

คำสำคัญ : การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า; วิธีการจีเนติก; ดี-สแตตคอม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม

E-mail: p_khunpan@windowslive.com

Abstract

This article proposes the model and controller design of D-STATCOM for load bus voltage regulation due to the voltage sag and swell. The model had been used to design a current control and DC voltage control. The current control used the hysteresis principles while the DC voltage control used P and I controller. The parameters of P and I controller were determined by the most appropriate method at the symmetrical optimal. For AC load bus voltage control, the P and I controller with the phase leading and lagging compensator are used. The parameters of AC voltage controllers were searched by Genetic Algorithm. The test system in this article was the simple electrical power distribution system by experimenting in the simulation program MATLAB/ Simulink. The result of this experimental showed that the D-STATCOM and the controller design could be maintained the level of the load bus voltage due to the sag and swell quickly within 0.01 seconds.

Keywords: Voltage Regulation; Genetic Algorithm; D-STATCOM

บทนำ

ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าหนึ่งที่เป็นปัญหาสำคัญคือการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน (Voltage Sag and Swell) แรงดันไฟฟ้าตกคือการลดลงของขนาดแรงดันที่ความถี่ไฟฟ้าปกติมาตรฐาน IEEE 1159 มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 0.01 วินาที ถึง 1 นาที (Ghosh, A. and Ledwich, G., 2002) และแรงดันไฟฟ้าเกินคือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ความถี่กำลังไฟฟ้าปกติ มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1 ถึง 1.8 p.u. ในช่วงเวลา 0.01 วินาที ถึง 1 นาที แรงดันไฟฟ้าตกอาจเกิดขึ้น เนื่องจากเกิดความผิดปกติในระบบการเพิ่มขึ้นของกระแสโหลดขนาดใหญ่ เพื่อป้องกันความสูญเสียของผู้ใช้ไฟฟ้าจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันเกินดี-สแตคคอม ซึ่งจะต้องนานเข้ากับระบบไฟฟ้า เมื่อเชื่อมต่อกับโหลดดี-สแตคคอม ถูกใช้เป็นตัวชดเชยให้กับโหลด เช่น การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การกรองฮาร์โมนิก และการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส เป็นต้น (Rao P. et al., 2000) ดี-สแตคคอมใช้หลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter : VSC) จึงถูกประยุกต์ใช้สำหรับการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัส (Padiyar K. R. and Kulkarni A. M., 1997; Chen, S. and Joos, G., 2000) โดยทั่วไปแล้วดี-สแตคคอมจะถูกจำลองโดยการแปลงบนแกนอ้างอิง d-q ตามการเคลื่อนที่ซิงโครนัส (Synchronous Rotating d-q Reference Frame) สำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุม (Schauder C. and Mehta H., 1993) ในหลายบทความได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมของดี-สแตคคอม ได้มุ่งเน้นศึกษาการควบคุมกระแสเอาต์พุตของดี-สแตคคอมและการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมกระแสแบบแยกการเชื่อมโยง

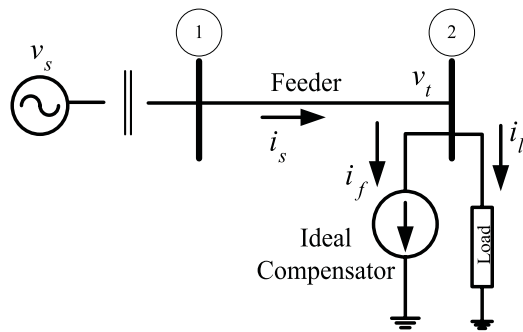
(Decoupling Current Control) บนกรอบอ้างอิง d-q ถูกนำเสนอใน (Molina, M. G. and Mercado, P. E., 2006) โดยการควบคุมกระแสจะใช้การควบคุมแบบพีและไอ (PI Controller) เพื่อควบคุมกระแสเอาต์พุตของดี-สแตคคอมให้ติดตามกระแสอ้างอิง ซึ่งกระแสอ้างอิงในแกน d และแกน q ได้มาจากชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสนอกจากนี้ (Woei-Luen Chen, Wei-Gang Liang and Hrong-Sheng Gau., 2010) ยังได้นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตคคอมด้วยตัวควบคุมแบบพีและไอ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ตลอดการทำงาน อย่างไรก็ตาม การควบคุมบนกรอบอ้างอิง d-q จำเป็นต้องมีตัวติดตามเฟส (Phase-Lock Loop) เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณบนกรอบ abc ไปเป็นสัญญาณกรอบอ้างอิง d-q นอกจากนี้การควบคุมนี้จะต้องมีชุดควบคุมแบบพีและไอสำหรับการควบคุมกระแส 2 ชุด ซึ่งทำให้ระบบควบคุมมีความซับซ้อนและมีความยุ่งยากในการออกแบบระบบควบคุม

บทความนี้จึงนำเสนอกลวิธีของการพิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ดี-สแตคคอม บนกรอบอ้างอิง abc โดยแบบจำลองที่ทำได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสน โดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Control) ทำให้การออกแบบระบบควบคุมมีความสะดวกและสามารถลดชุดควบคุมแบบพีและไอสำหรับการควบคุมกระแสลงได้ นอกจากนี้ด้วยการควบคุมบนกรอบอ้างอิง d-q ระบบควบคุมนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีชุดติดตามเฟส เป็นผลให้การออกแบบระบบควบคุมสามารถทำได้ง่ายและใช้เวลาในการคำนวณสั้นลงด้วย ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและไอถูกหาโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร (Symmetrical Optimum) ในขณะที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัสนจะใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินตคณิต

วิธีการดำเนินการทดลอง

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ระบบที่นำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลอง เป็นระบบจำหน่ายที่จ่ายโหลด โดยมีอุปกรณ์ชดเชยต่อขนานกับโหลดดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายที่เปรียบเสมือนเป็นบัสอนันต์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดผ่านสายป้อน โหลดจะถูกพิจารณาว่าเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยมีตัวเก็บประจุต่อขนาน ซึ่งทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิกและแก้อังค์ประกอบกำลัง

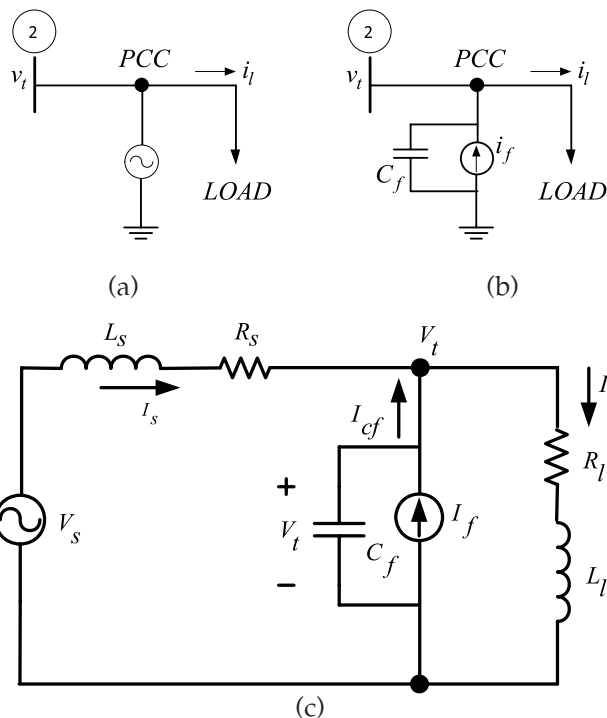


รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายที่ติดตั้งดี-สแตคคอม

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการของกระแสไฟฟ้าด้วย KCL ได้ดังนี้

$$i_f = i_s + i_l \quad (1)$$

เมื่อดี-สแตคคอมทำหน้าที่ชดเชยแรงดันของระบบดี-สแตคคอมจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกต่อเชื่อมเข้าระบบที่จุด PCC ดังรูปที่ 2 (a) ดี-สแตคคอมจะรักษาแรงดันที่ระบบ โดยการฉีดกระแสเข้าสู่ระบบเพื่อทำให้แรงดันที่บัส 2 มีค่าตามแรงดันอ้างอิง ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะไม่มีการจ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้าจริงในสภาวะคงตัวดังรูปที่ 2 (b) และเมื่อระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าติดตั้งดี-สแตคคอมทำให้ได้วงจรสมมูลของระบบดังรูปที่ 2 (c)



รูปที่ 2 การทำงานในสภาวะคงตัวของดี-สแตคคอม

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2 (c) ถ้ากำหนดให้ทั้งหมดเป็นระบบสามเฟสสมดุลสมการของระบบได้ดังสมการที่ (2) - (4)

$$L_s \frac{di_{s,abc}}{dt} = -R_s i_{s,abc} - v_{t,abc} + v_{s,abc} \quad (2)$$

$$C_f \frac{dv_{t,abc}}{dt} = -i_{l,abc} + i_{s,abc} + i_{f,abc} \quad (3)$$

$$L_l \frac{di_{l,abc}}{dt} = -R_l i_{l,abc} + v_{t,abc} \quad (4)$$

โดยที่ $i_{s,abc}$, $i_{f,abc}$, $v_{s,abc}$ และ $v_{t,abc}$ คือเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าของแต่ละเฟส L_l และ R_l คือความเหนี่ยวนำและความต้านทานของโหลด L_s และ R_s คือความเหนี่ยวนำและความต้านทานของแหล่งจ่ายรวมกับสายป้อน และ C_f คือตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ

อุปกรณ์ดี-สแตคคอมและการควบคุม

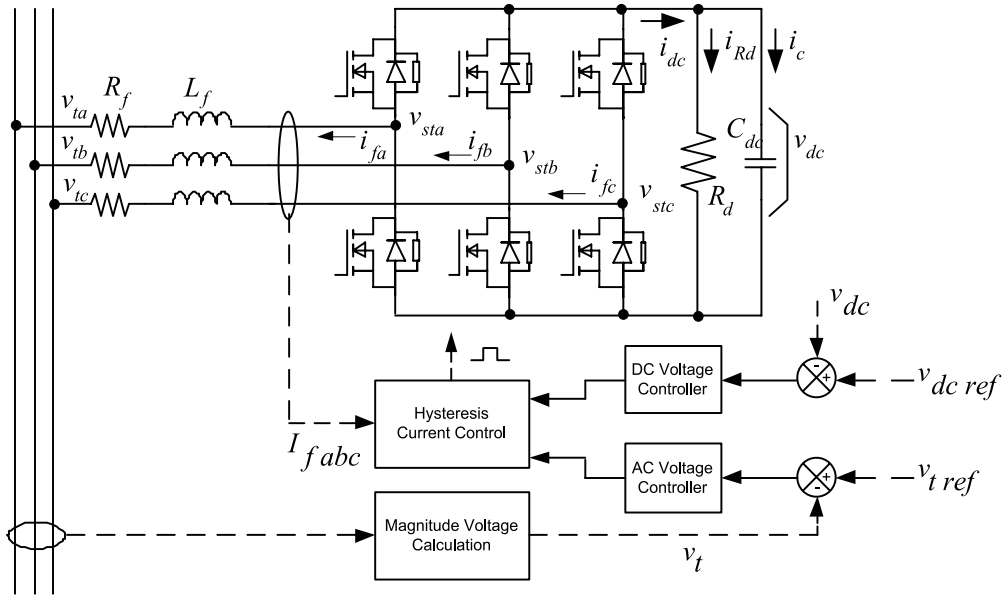
เมื่อพิจารณาการชดเชยแรงดันของดี-สแตคคอมตามรูปที่ 2 (c) ดี-สแตคคอมจะทำงานคล้ายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันด้วยการฉีดกระแส i_f เข้าสู่ระบบเพื่อทำให้แรงดัน v_t มีค่าตามแรงดันอ้างอิง หากพบว่าแรงดันของระบบเกินแรงดันอ้างอิงดี-สแตคคอมจะควบคุมกำลังรีแอกทีฟ แต่หากแรงดันตก ดี-สแตคคอมจะทำการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบดี-สแตคคอมที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่เป็นสวิช ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อวงจรแปลงผันกับระบบจำหน่าย และบางครั้งอาจทำหน้าที่เป็นตัวกรองฮาร์มอนิก ร่วมกับตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ ชุดควบคุมมี 3 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อพิจารณาด้านไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ทำให้เขียนสมการของอุปกรณ์ดี-สแตคคอมได้ดังนี้

$$L_f \frac{di_{f,abc}}{dt} = -R_f i_{f,abc} + v_{t,abc} - v_{st,abc} \quad (5)$$

โดยที่ $v_{st,abc} = S_{abc} k v_{dc}$ คือแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ดี-สแตคคอมและ R_f คือความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Inductor Parasitic Resistance) ในขณะ k คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรแปลงผันและอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วน $S_{abc} = S_{abc,up} - S_{abc,low}$ คือสัญญาณการควบคุมสวิชของแต่ละเฟส สำหรับด้านไฟฟ้ากระแสตรงจากรูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าตรง i_{dc} ประกอบด้วย กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเชื่อมโยงกระแสตรง i_c และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน i_l โดยที่ความต้านทาน R_d แทนการสูญเสียในวงจรแปลงผัน หรืออาจกล่าวได้ว่าความต้านทาน R_d และ R_f แทนการสูญเสียแฝงในอุปกรณ์ดี-สแตคคอมนั่นเอง กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันจะเท่ากับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรแปลงผัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Power DC} = -\text{Power AC} \quad (6)$$

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{v_{dc}}{R_d} - \frac{v_{sta} i_{fa}}{v_{dc}} - \frac{v_{stb} i_{fb}}{v_{dc}} - \frac{v_{stc} i_{fc}}{v_{dc}} \quad (7)$$



รูปที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานของดี-สแตคคอม

ชุดควบคุมกระแสแบบฮีเทอริซิสของอุปกรณ์ดี-สแตคคอม

การควบคุมแบบฮีเทอริซิสถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การรักษาค่าแรงดันไฟฟ้า และยังสามารถลดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่โหลดได้อีกด้วย (Shukla A. et al., 2005) วิธีการควบคุมแบบนี้คือ การนำกระแสที่ได้จากดี-สแตคคอมทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นผลจากเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า 2 ส่วนคือ แรงดันหนึ่งหน่วย (Unit Voltage) และแรงดันตั้งฉาก (Quadrature Voltage) คำนวณได้ดังสมการที่ (8) และ (9) จากสมการทั้ง 2 นี้ จะทำให้ได้กระแสที่เป็นองค์ประกอบอินเฟส (In-Phase Component) และกระแสที่เป็นองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature Component) ดังสมการที่ (10) และ (11) และจะนำสัญญาณของกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วนนี้ มารวมกันตามสมการที่ (12) ชุดควบคุมกระแสแบบฮีเทอริซิสของดี-สแตคคอมแสดงในรูปที่ 5

$$u_{ta} = \frac{v_{ta}}{v_t}$$

$$u_{tb} = \frac{v_{tb}}{v_t}$$

$$u_{tc} = \frac{v_{tc}}{v_t} \quad (8)$$

องค์ประกอบแรงดันคั้งฉาก (w_{ia} , w_{tb} และ w_{ic}) ที่ได้จากการแปลงเวกเตอร์อินเฟส (u_{ia} , u_{tb} และ u_{ic}) โดยมีสมการในการแปลงคั้งฉากนี้

$$\begin{aligned} w_{ia} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{tb} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{ic} \\ w_{tb} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{ic} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{ia} \\ w_{ic} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}u_{ia} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_{tb} \end{aligned} \quad (9)$$

โดยที่ $v_t = \sqrt{v_{ia}^2 + v_{tb}^2 + v_{ic}^2}$ ในส่วนของกระแสอ้างอิงอินเฟสและกระแสอ้างอิงคั้งฉากสามารถเขียนเป็นสมการได้คั้งฉากนี้

$$\begin{aligned} i_{fad}^* &= i_{fmd}^* u_{ia} \\ i_{fbd}^* &= i_{fmd}^* u_{tb} \\ i_{fcd}^* &= i_{fmd}^* u_{ic} \end{aligned} \quad (10)$$

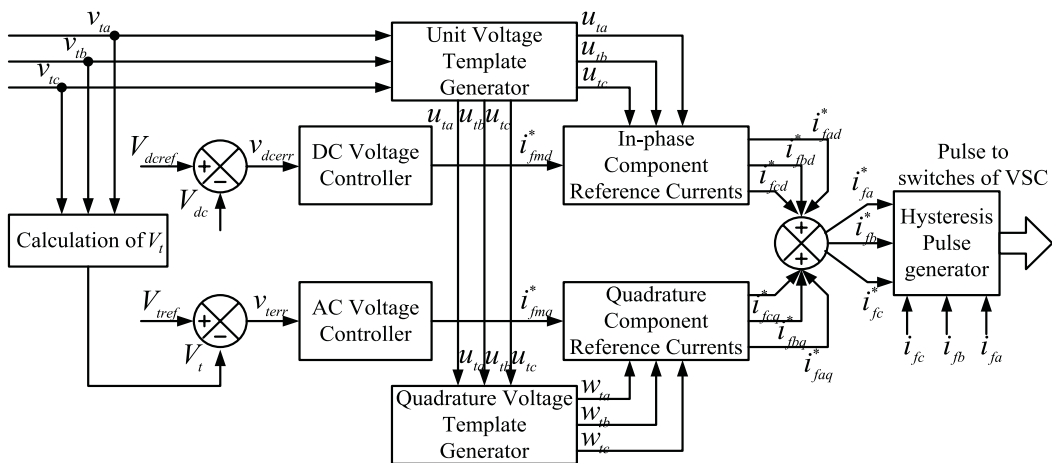
และ

$$\begin{aligned} i_{faq}^* &= i_{fmq}^* w_{ia} \\ i_{fbq}^* &= i_{fmq}^* w_{tb} \\ i_{fcq}^* &= i_{fmq}^* w_{ic} \end{aligned} \quad (11)$$

โดยที่ i_{fmd}^* และ i_{fmq}^* เป็นกระแสไฟฟ้าแอกทีฟและกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งได้จากการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของดี-สแตคคอมและการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ตามลำดับ กระแสอ้างอิงของดี-สแตคคอม ได้จากผลรวมกระแสขององค์ประกอบหนึ่งหน่วยและองค์ประกอบคั้งฉากคั้งฉากแสดงในสมการที่ (12)

$$\begin{aligned} i_{fa}^* &= i_{faq}^* + i_{fad}^* \\ i_{fb}^* &= i_{fbq}^* + i_{fbd}^* \\ i_{fc}^* &= i_{fcq}^* + i_{fcd}^* \end{aligned} \quad (12)$$

ชุดควบคุมกระแสจากสมการที่ (8) - (12) แสดงได้คั้งรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิสของดี-สแตคคอม

ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

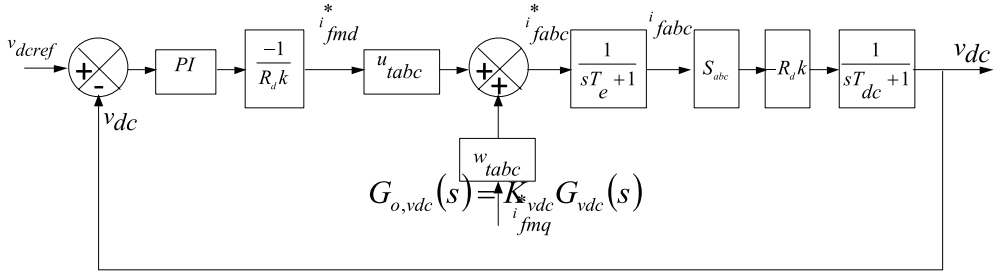
เนื่องจากการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างกระแสอ้างอิงอินเฟส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระแสที่จะผ่านไปยังชุดควบคุมแบบฮีสเตอร์รีซิส เพื่อใช้สร้างสัญญาณพัลส์สำหรับอุปกรณ์สวิตช์จากสมการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอุปกรณ์ดี-สแตคคอม เมื่อนำมาเขียนใหม่จะได้ดังนี้

$$R_d C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} = -i_{fmd}^* \quad (13)$$

โดยที่ $i_{fmd}^* = kR_d (S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc})$ ดังนั้น จากสมการที่ (13) จะทำได้

$$v_{dc} = \frac{-i_{fmd}^*}{sT_{dc} + 1} \quad (14)$$

โดยที่ $T_{dc} = R_d C_{dc}$ จากสมการที่ (14) จะพบว่าการลดลงของสัญญาณ i_{fmd}^* จะส่งผลให้ v_{dc} เพิ่มขึ้นและในทำนองเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของสัญญาณ i_{fmd}^* จะส่งผลให้ v_{dc} ลดลง ดังนั้นกระแสแอคทีฟอ้างอิง i_{fmd}^* สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จึงสามารถหาได้จากตัวควบคุมแบบพีและไอ ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากไดอะแกรมในรูปที่ 5 พิจารณาตัวควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิสมีค่าการหน่วงเวลา T_e อย่างไรก็ดีตามค่าหน่วงเวลานี้มีค่าน้อยมากโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{1.5}{2f_{sw}}$ ถึง $\frac{1}{f_{sw}}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$G_{o,vdc}(s) = K_{vdc} G_{vdc}(s) \quad (15)$$

เมื่อ

$$K_{vdc} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{kR_d}\right) u_{t,abc} - k_p \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i}\right) \left(\frac{1}{kR_d}\right) u_{t,abc} \quad (16)$$

$$G_{vdc}(S) = \left(\frac{1}{sT_{dc} + 1}\right) \left(\frac{kR_d}{sT_e + 1}\right) S_{abc} \quad (17)$$

โดยที่ $T_i = \frac{k_p}{k_i}$ ดังนั้น

$$G_{o,vdc}(S) = -k_p \left(\frac{sT_i + 1}{sT_i}\right) \left(\frac{1}{sT_{dc} + 1}\right) \left(\frac{1}{sT_e + 1}\right) \quad (18)$$

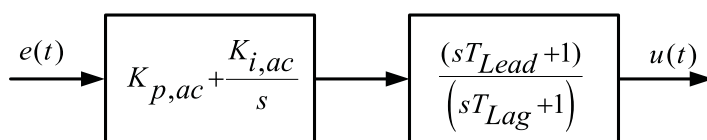
จากสมการที่ (18) สามารถใช้วิธีการปรับค่าการพิจารณาตัวควบคุมแบบพีและไอ โดยใช้วิธีค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร (Friedrich F. and Fritz O., 1992; Marian, P. et al., 2002) ได้ดังสมการที่ (19)

$$k_p = \frac{T_{dc}}{2K_d T_e} \quad (19)$$

$$T_i = 4T_e \quad (20)$$

การออกแบบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอุปกรณ์ดี-สแแตกคอม ต้องการให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะในการตามรอยคำสั่งให้ค่าแตกต่างในการตามรอยมีค่าน้อยที่สุดและมีสมรรถนะในการจัดการรบกวนได้ดี ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีและไอ ซึ่งมีคุณสมบัติในการตามรอยคำสั่งและจัดการรบกวนได้ดีทำงานดังแสดงในรูปที่ 6 (Kittaya S., 2012)

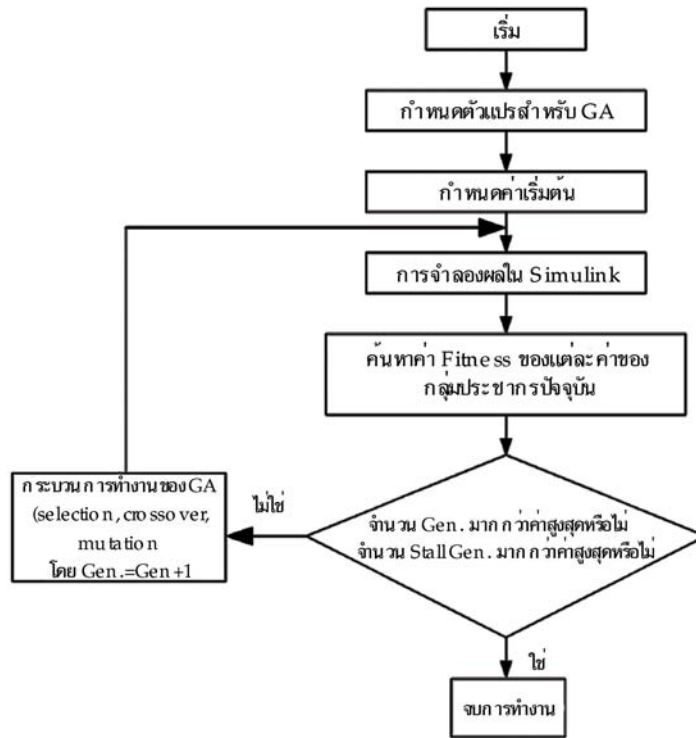


รูปที่ 6 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

อย่างไรก็ตามจากสมการของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์ ดี-สแแตกคอมดังสมการที่ (1) - (5) พบว่าระบบมีความซับซ้อนและไม่สามารถหาสมการวงปิดของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ ส่งผลให้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ไม่สามารถใช้วิธีการดั้งเดิม (Classical Control) ดังนั้นในบทความนี้จึงใช้การหาค่าพารามิเตอร์ $K_{p,ac}$, $K_{i,ac}$, T_{Lead} และ T_{Lag} ด้วยวิธีการปัญญาประดิษฐ์

การหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีการจีเนติก

จีเนติกอัลกอริทึม (GAs) เป็นอีกกระบวนการที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบการควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ GAs คือเทคนิคการลู่เข้าข้อมูลที่เป็นประโยชน์ของกลุ่มประชากรนั้น ๆ มาเข้ากระบวนการแก้ปัญหาของ GAs ที่เรียกว่าปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation) อันได้แก่ การรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (Recombination Operator) หรือการครอสโอเวอร์ (Crossover) และมิวเทชัน (Mutation) เป็นต้น ข้อมูลหรือสายพันธุ์ที่ถูกปรับปรุงแล้วจะนำไปปรับปรุงต่อไปเรื่อย ๆ โดยมีทิศทางที่ไปยังจุดหมายเดียวกันเพื่อหาคำตอบของจุดประสงค์นั้น ๆ เนื่องจาก GAs นั้นได้เป็นที่นิยมใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย (Kittaya, S. et al., 2012) กระบวนการทำงานของจีเนติกในบทความนี้ได้แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระบวนการทำงานของจินตนาการ

ในส่วนนี้เลือกที่จะนำวิธีการของ GAs มาใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ $K_{p,ac}$, $K_{i,ac}$, T_{Lead} และ T_{Lag} ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่โหนดบัส ในลำดับขั้นตอนของการปรับค่าพารามิเตอร์นี้เป็นการจำลองการหาค่าตัวควบคุมพีและไอของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย MATLAB/Simulink ก่อให้เกิดการแกว่งของขนาดและความถี่ในโดเมนของเวลา กล้องเครื่องมือของ GAs จะเตรียมชุดข้อมูลตั้งต้นเพื่อใช้ในการปรับพารามิเตอร์จากกระบวนการที่ค้นหาค่าพารามิเตอร์นั้นจะถูกปรับปรุงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่เข้าใกล้กับจุดประสงค์ที่ต้องการมากที่สุด โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) จะเป็นสิ่งที่บอกกว่าคำตอบที่ได้นั้นสามารถให้ผลตอบสนองที่ดีกับระบบที่ต้องการได้ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในส่วนนี้แสดงดังสมการที่ (21)

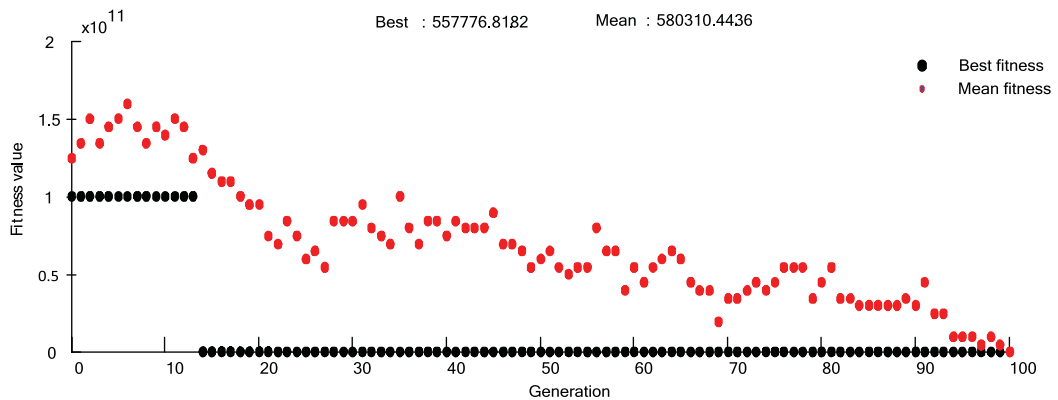
$$\min \left\{ \int_0^{t_{sim}} (\Delta v_{td}(t))^2 dt \right\} \quad (21)$$

เมื่อ $\Delta v_{td}(t) = v_{td \text{ desired}} - v_{td \text{ sim}}$

$v_{td \text{ desired}}$ คือ ผลตอบสนองแรงดันกระแสสลับที่ต้องการ

$v_{td \text{ sim}}$ คือ แรงดันกระแสสลับที่ได้จากการจำลองผล

สำหรับการหาค่าพีและโอที่เหมาะสมที่สุดในชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย GAs นั้น ได้ผลการค้นหาดังรูปที่ 8 โดยพบว่าการลู่เข้าของค่าตอบของ Mean Fitness นั้นมีค่าที่ลดลงเรื่อย ๆ จนถึงรุ่นที่ตั้งค่าไว้ และค่า Best Fitness ได้ลู่เข้าหาค่าตอบประมาณรุ่นที่ 15 ของการค้นหา



รูปที่ 8 การค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วย GA

ผลการทดลองและวิจารณ์

สำหรับการออกแบบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบนี้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นระบบการทดสอบแบบ 2 บัส ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองผล

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบ

พารามิเตอร์	ปริมาณ	พารามิเตอร์	ปริมาณ
V_s	22 kV	R_d	21780 Ω
R_s	1.45644 Ω	R_f	0.01 Ω
L_s	38.666 mH	L_f	13.76 mH
R_L	116 Ω	C_f	5e-6 F
L_L	1 mH	Cdc	33e-6 F

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของชุดควบคุมแรงดันกระแสตรงแสดงในตารางที่ 2 และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับจากการค้นหาด้วยวิธีจีเนติกแสดงในตารางที่ 3

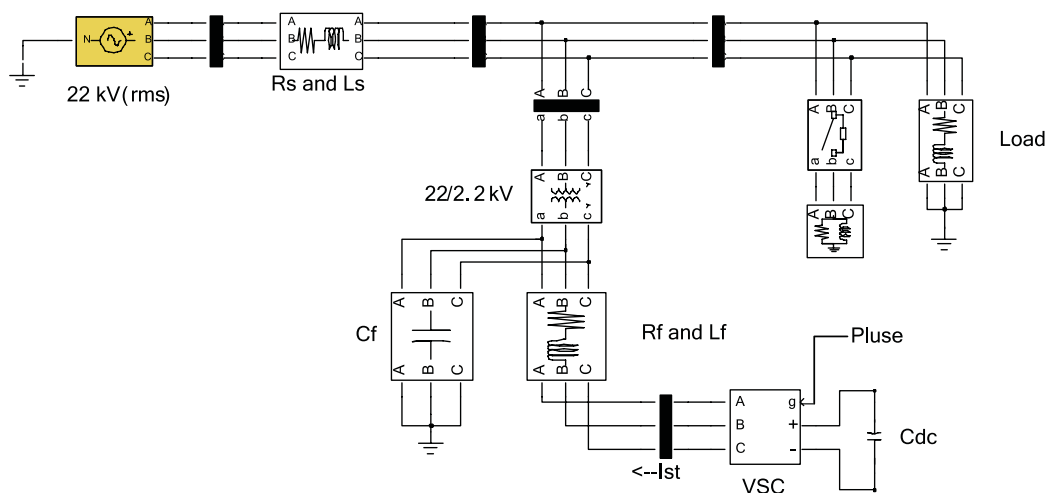
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของชุดควบคุมแรงดันกระแสตรง

พารามิเตอร์	ปริมาณ	พารามิเตอร์	ปริมาณ
T_{dc}	0.718	K_p	-897.5
T_i	0.0016	K_i	560937.5
T_e	0.0004	T_d	0.001

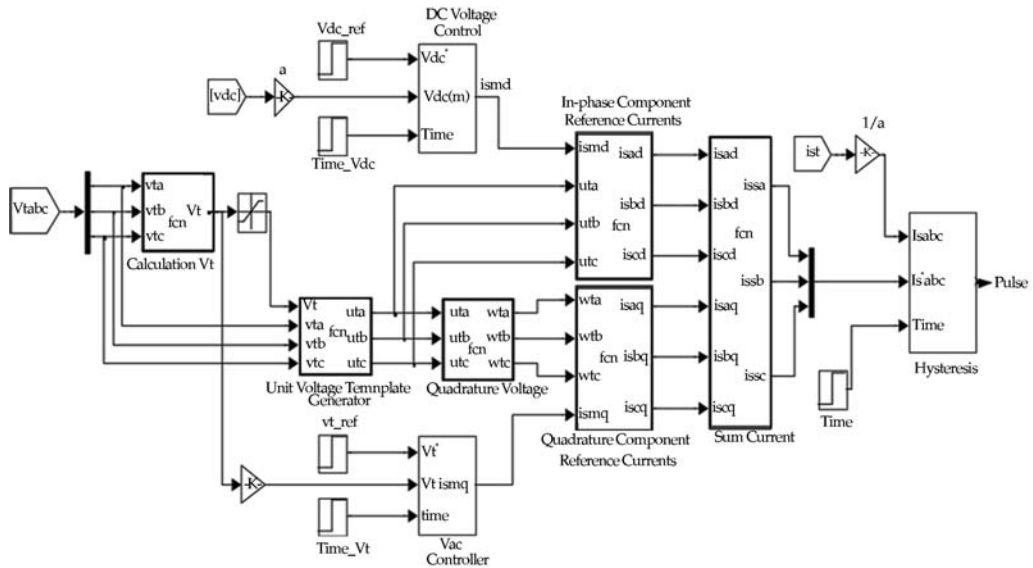
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับจากการค้นหาด้วยวิธีจินตคณิต

กรณี	T_{Lead}	K_i	T_{Lag}	Best Fitness
แรงดันตก 0.3 pu.	0	-8.455	0.003	557776.818
แรงดันเกิน 0.1 pu.	0	-15.095	0.003	252432.083

จากพารามิเตอร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ได้นำมาจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าได้มีอุปกรณ์แปลงผันติดตั้งไว้ในระบบด้วย ซึ่งอุปกรณ์แปลงผันก็คือดี-สแตคคอมนั่นเอง และได้แสดงชุดควบคุมการทำงานของดี-สแตคคอมในรูปที่ 10



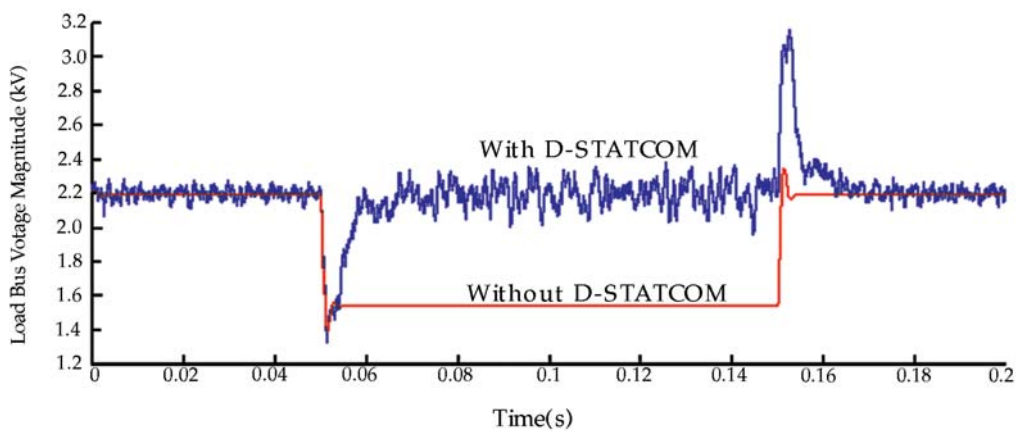
รูปที่ 9 ระบบที่ใช้ทดสอบด้วย MATLAB/Simulink



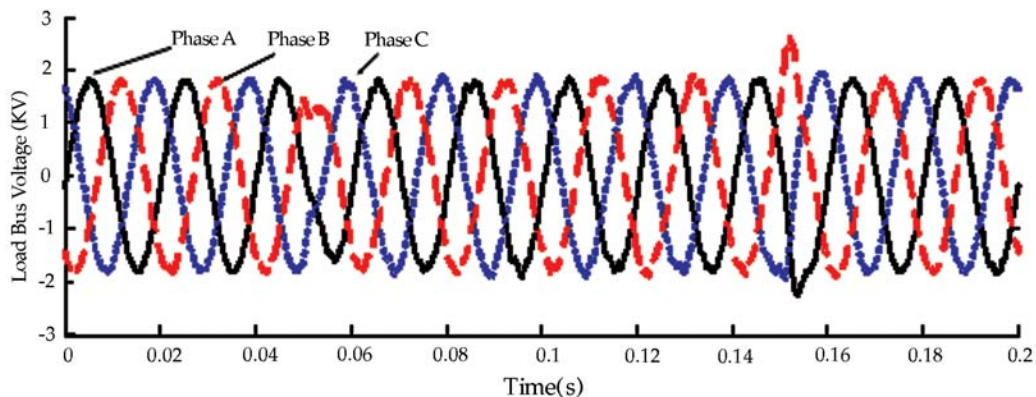
รูปที่ 10 ชุดควบคุมอุปกรณ์ดี-สแตตคอมใช้ทดสอบด้วย MATLAB/Simulink

ผลการทดสอบกรณีแรงดันไฟฟ้าตก 0.3 p.u.

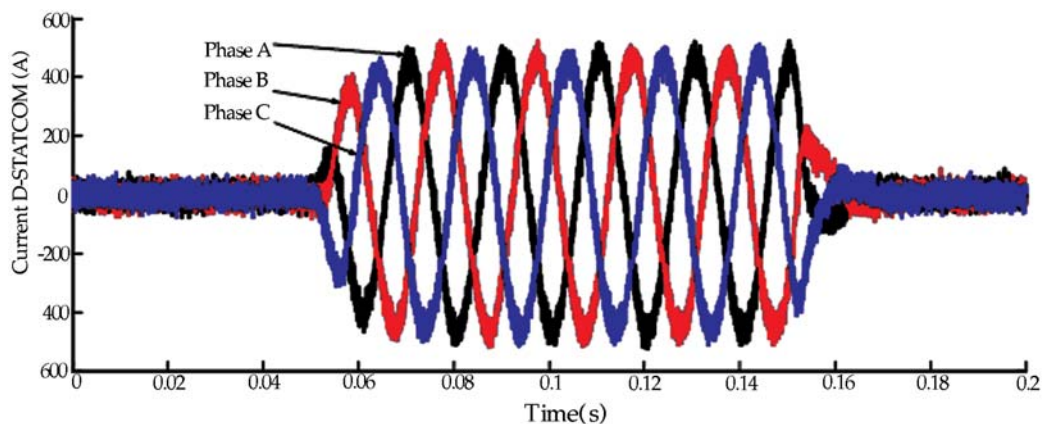
ผลการจำลองอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอกรณีเกิดแรงดันตก 0.3 p.u. ในรูปที่ 11 เป็นขนาดของแรงดันที่โหลดบัสในกรณีที่ไม่มีและไม่มีอุปกรณ์ดี-สแตตคอมที่ทำหน้าที่ชดเชยแรงดันที่โหลดบัสเป็นเวลา 0.05 วินาที เกิดแรงดันของระบบตก 0.3 p.u. พบว่าอุปกรณ์ดี-สแตตคอมสามารถชดเชยแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01 วินาที โดยสัญญาณของแรงดันและกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 11 สัญญาณแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย



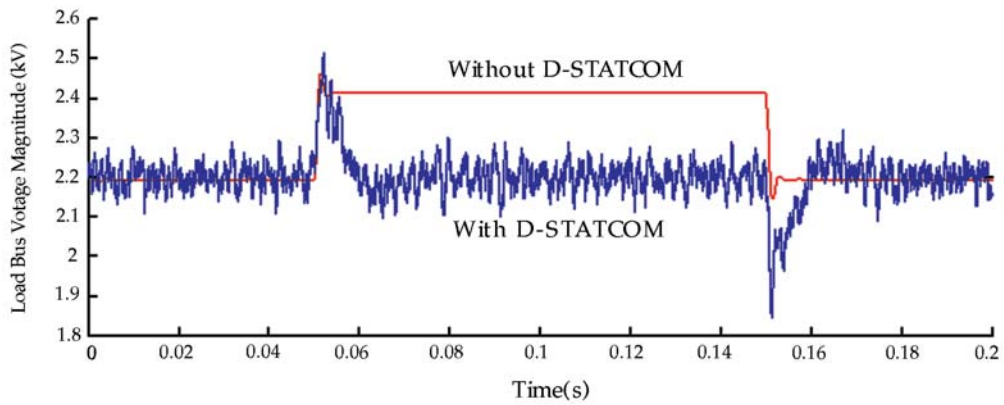
รูปที่ 12 สัญญาณแรงดันที่บัสที่แรงดันตก 0.3 p.u.



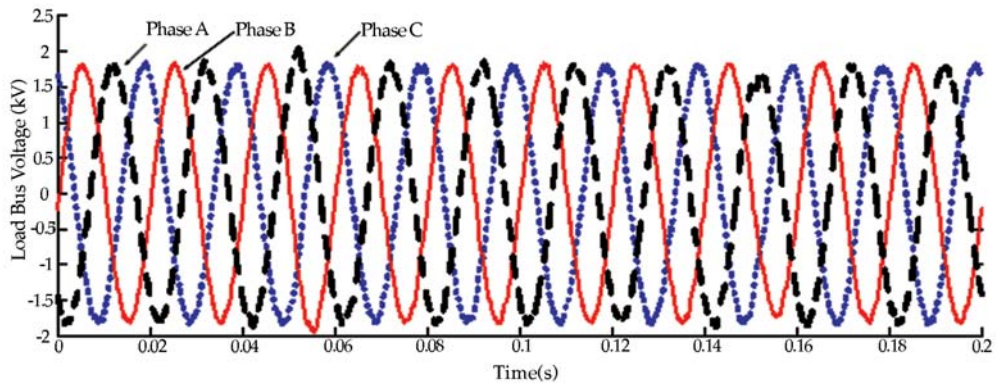
รูปที่ 13 สัญญาณกระแสที่โหลดที่แรงดันตก 0.3 p.u.

ผลการทดสอบกรณีแรงดันไฟฟ้าเกิน 0.1 p.u.

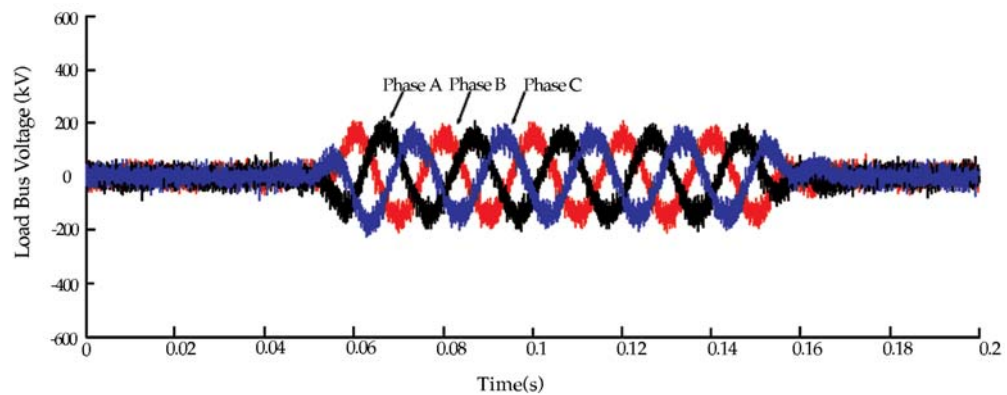
ผลการจำลองอุปกรณ์ดี-สแตคคอมและระบบควบคุมที่นำเสนอกรณีเกิดแรงดันเกิน 0.1 p.u. ในรูปที่ 14 เป็นขนาดของแรงดันที่โหลดบัสในกรณีที่มิและมีอุปกรณ์ดี-สแตคคอมที่ทำหน้าที่ชดเชยแรงดันที่โหลดบัสที่เวลา 0.05 วินาที เกิดแรงดันของระบบเกิน 0.1 p.u. พบว่าอุปกรณ์ดี-สแตคคอมสามารถชดเชยแรงดันให้เข้าสู่ระดับแรงดันปกติภายในเวลา 0.01 วินาที โดยสัญญาณของแรงดันและกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 15 และ 16



รูปที่ 14 สัญญาณแรงดันที่บัส ก่อนและหลังการชดเชย



รูปที่ 15 สัญญาณแรงดันที่บัสที่แรงดันตก 0.3 p.u.



รูปที่ 16 สัญญาณกระแสที่โหลดที่แรงดันเกิน 0.1 p.u.

สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอกลวิธีของการพิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ดี-สแตตคอม บนกรอบอ้างอิง abc โดยแบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง และชุดควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัล โดยชุดควบคุมกระแสใช้หลักการควบคุมแบบฮิลเตอร์ริซ ในส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีและไอถูกหาโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่จุดสมมาตร ในขณะที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดบัลจะใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีจินตคณิต ในการออกแบบจะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการจำลองผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับบนโปรแกรม MATLAB/Simulink อุปกรณ์ดี-สแตตคอม และชุดควบคุมที่นำเสนอถูกทดสอบบนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสองบัสอย่างง่าย ด้วยการจำลองโดยใช้ PSB ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลของการจำลองแสดงให้เห็นถึงควมมีประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดี-สแตตคอมและชุดควบคุมที่นำเสนอในการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัล เนื่องจากเกิดแรงดันตกและเกินได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพที่จุดทำงานต่าง ๆ

References

- Acha E., Agelidis V. G., Anaya-Lara O. and Miller T. J. E., (2002). Power Electronic control in Electrical system. Oxford : Reed Educational and Professional
- Chen, S. and Joos, G. (2000). Series and shunt active power conditioners for compensating distribution system faults. In Proceeding Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Vol. 2. pp. 1182-1186
- Friedrich, F. and Fritz, O. (1992). Introduction to electronic control engineering. New Delhi: Second Wiley Eastern Reprint
- Ghosh, A. and Ledwich, G. (2002). Power quality enhancement using custom power devices. Massachusetts: Kluwer Academic
- Kittaya S. (2012). Control design and application of D-STATCOM for load voltage control. Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Suranaree university of Technology
- Kittaya S. Kulworawanichpong and Voraphonpipit N., (2012). Design of DC voltage control for D-STATCOM. World Academy of Science, Engineering and Technology. Issue 71. p. 420
- Marian P., Kazmierkowski, R., Krishnan and Frede Blaabjerg. (2002). Control in power electronics selected problems. California: Elsevier Science
- Molina, M. G. and Mercado, P. E., (2006). Control design and simulation of DSTATCOM with energy storage for power quality improvements. IEEE/PES Transmission & Distribution Conf. Exposition. Latin America, TDC'06. pp. 1-7

- Padiyar K. R. and Kulkarni A. M. (1997). Design of reactive current and voltage controller of static condenser. In *international journal of electrical power energy system*. Vol. 19. No. 6. pp. 397-410
- Rao P., Crow M. L. and Yang Z. (2000). STATCOM control for power system voltage control Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 15. No. 4. pp. 1311-1317
- Schauder C. and Mehta H., (1993). Vector analysis and control of advanced static var Compensators. In *Proceedings-C Generation Transmission & Distribution*. Vol. 4. No. 4. pp. 299-306
- Shukla A., Ghosh A., and Joshi A. (2005). A hysteresis current controlled flying capacitor multilevel inverter based DSTATCOM. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Vol. 1. pp. 857-864
- Woei-Luen Chen, Wei-Gang Liang, and Hrong-Sheng Gau., (2010). Design of a mode decoupling STATCOM for voltage control of wind-driven induction generator systems. *IEEE Transactions on power delivery*. Vol. 25. No. 3. pp.1758-1767