

**การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กู้คืน
แรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะ
และแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว**
**An Application of Sliding Mode Control for a Dynamic Voltage
Restorer to Correct Unbalanc Voltage, Voltage Sags and Voltage
Swells in Three-Phase System Using Rapid Algorithm**

ทวีศักดิ์ ทองแสน (Taweesak Thongsan)^{1*} ดร.ธีรยุทธ ชาดิชนะยีนยง (Dr.Theerayuth Chatchanayuenyong)**
ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณทา (Dr.Nattawoot Suwanta)***

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดด้วยการกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบเร็ว โดยใช้หลักการของเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันสามเฟสเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะ และแรงดันเกินชั่วขณะ หลักการสร้างแรงดันอ้างอิงให้กับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดจะไม่อยู่บนพื้นฐานของการแยกส่วนประกอบที่สมมาตรทำให้ลดความซับซ้อนของอัลกอริทึมการคำนวณที่ง่ายทำให้ได้ผลตอบสนองที่เร็วซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมแบบเวลาจริง แรงดันอ้างอิงจะถูกป้อนให้กับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดซึ่งเป็นตัวควบคุมวงปิดแบบไม่เชิงเส้น ตัวอย่างการออกแบบและกรณีศึกษาต่างๆ ตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 ได้ถูกนำเสนอ ผลการจำลองได้พิสูจน์ถึงความถูกต้องของหลักการและความเป็นไปได้ของอัลกอริทึม

ABSTRACT

This paper presents the sliding mode controller (SMC) with rapid reference voltage generation based on phasor diagram of three-phase voltage to correct unbalance voltage, voltage sags and voltage swells in three-phase system. The reference voltage generation for the SMC is not based on three-symmetrical component decomposition, hence the algorithm complexity is reduced with simple calculation leading to quickly response that is essential in such a critical real-time control work. The reference voltages are fed to the SMC, which is a non-linear closed loop controller. The design examples and various case studies in accordance as IEEE 1159-1995 are illustrated. Its simulation results prove the concept and validate the proposed algorithm.

คำสำคัญ: การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด คุณภาพกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัต

Keywords: Sliding mode control, Power quality, Dynamic voltage restorer

¹ Correspondent author: thaweesak07@hotmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

*** อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Sensitive load) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ตัวควบคุมกระบวนการผลิต อุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ พีแอลซี (PLC Programmable logic controller) และมอเตอร์เป็นต้นอุปกรณ์เหล่านี้ค่อนข้างอ่อนไหวต่อความผิดปกติของแรงดันจากแหล่งจ่าย โดยรูปแบบของความผิดปกติของแรงดันที่สำคัญได้แก่ แรงดันไม่สมดุล (Unbalance voltage) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sags) และแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage swells) แรงดันไม่สมดุลมีสาเหตุจากความไม่สมดุลของโหลดเฟสเดียวในระบบสามเฟส ความผิดปกติของชุดคาปาซิเตอร์ การขาดหายไปของแรงดันบางเฟสยังผลให้เกิดความร้อนขึ้นในระบบกำเนิด สายส่งและอุปกรณ์ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แรงดันตกชั่วขณะเกิดจากการสวิตซ์เข้า-ออกของโหลดขนาดใหญ่ การเริ่มเดินมอเตอร์ขนาดใหญ่ แรงดันตกแค่เพียงชั่วครู่หรือภายในเสี้ยววินาที ก็จะมีผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาดหรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพและยังส่งผลกระทบต่อมากมายตามมา ไม่ว่าจะเป็นชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์เสียหาย กระบวนการผลิตล่าช้า รวมทั้งอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านั้นสั้นลง ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตโดยเปล่าประโยชน์ ส่วนแรงดันเกินชั่วขณะเป็นผลมาจากการลัดวงจรเฟสเดียวของสายลงดินรวมทั้งการสวิตซ์โหลดขนาดใหญ่หรือชุดคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ออกจากระบบ ซึ่งถ้าหากเกิดขึ้นบ่อยๆ ก็จะมีผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ [1-3]

จากการปริทัศน์เอกสารข้อมูลพบว่ามีการหลายวิธีในการลดความผิดปกติของแรงดันเหล่านี้ โดยประกอบด้วยสองวิธีหลักๆ ได้แก่การปรับปรุงตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าให้มีความคงทนต่อความผิดปกติของแรงดันที่เกิดขึ้น และอีกวิธีหนึ่งคือการติดตั้งอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตที่แหล่งจ่ายแรงดัน แต่วิธีที่

คุ้มค่าและประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าคือการติดตั้งอุปกรณ์กักแรงดันพลวัต [4-5] โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตจะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันหน่วยเก็บพลังงาน วงจรองค์ประกอบความถี่แบบพาสซีฟ หม้อแปลงเชื่อมต่อแรงดันและรูปแบบการควบคุม [6] เทคนิคหรือหลักการที่ใช้ในการสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับตัวควบคุมของอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตส่วนใหญ่จะใช้ทฤษฎีฟอเรียส (Fortescue theory) ในการแยกส่วนประกอบที่สมมาตร (Symmetrical components) ของแรงดัน เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแรงดันอ้างอิง ตัวอย่างอัลกอริทึมดังกล่าวได้แก่คาลมาน ฟิลเตอร์ (Kalman filter) [7-9] โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) [10] และการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) [9, 11] เป็นต้น อย่างไรก็ตามการแยกส่วนประกอบที่สมมาตรโดยใช้วิธีการดังกล่าวมีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน ต้องการข้อมูลที่ใช้ในอัลกอริทึมมาก ใช้เวลานานในการคำนวณ ทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานจริงและมีผลต่อความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์กักแรงดันพลวัต ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดในการแก้ไขความผิดปกติของแรงดัน โดยเฉพาะงานในลักษณะนี้ซึ่งเป็นการควบคุมเวลาจริงแบบวิกฤติ (Critical real time control)

เทคนิคของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันของอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกันได้แก่ การควบคุมแบบเชิงเส้นและการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น [12] โดยปกติแล้วอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตจะเป็นอุปกรณ์ประเภทไม่เชิงเส้นเนื่องจากมีส่วนประกอบที่เป็นสวิตซ์กึ่งตัวนำกำลังในชุดอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการใช้การควบคุมแบบเชิงเส้นกับอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตจะทำงานได้ดีในสภาวะการทำงานในย่านแคบๆ เมื่อจุดทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์เปลี่ยน พารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมจะต้องถูกออกแบบใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งต่างจากตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่สามารถ

ควบคุมการทำงานได้ดีตลอดทุกย่านสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ ดังนั้นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ควบคุมอุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตมากกว่าแบบเชิงเส้น การควบคุมแบบไม่เชิงเส้นได้แก่การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม [13] การควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy control) [14] และการควบคุมแบบสไลด์โหมด (Sliding mode control) [15] เป็นต้น การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมมีการคำนวณที่ใช้เวลานานทำให้เกิดการหน่วงเวลาในการควบคุมและต้องการความสามารถของตัวประมวลผลสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องการสถาปัตยกรรมแบบขนาน ตัวควบคุมแบบฟัซซีมีคุณสมบัติที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของฟัซซีเซต ดังนั้นสมรรถนะในการทำงานต้องอาศัยความรู้และความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบสูง ส่วนตัวควบคุมแบบสไลด์โหมดเป็นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพมีโครงสร้างของการควบคุมที่เปลี่ยนแปลงได้ตามสถานะที่เปลี่ยนไปของอุปกรณ์ที่มันควบคุม ไม่ไวต่อความไม่แม่นยำถูกต้องของแบบจำลอง หรือการเปลี่ยนไปของพารามิเตอร์ของระบบ และไม่อ่อนไหวต่อสิ่งรบกวนภายนอกอย่างไรก็ตาม งานวิจัยใน [15] สร้างแรงดันอ้างอิงของตัวควบคุมสไลด์โหมดโดยใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้งานจริง

งานวิจัยนี้นำเสนออุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะ และแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็วซึ่งใช้หลักการของเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันสามเฟสในการสร้างแรงดันอ้างอิงให้กับตัวควบคุมแบบสไลด์โหมดโดยไม่จำเป็นต้องแยกส่วนประกอบที่สมมาตร ทำให้ได้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและแม่นยำโพลต์ที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตของงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยโพลต์เชิงเส้น R-L (R-L Linear load) และมอเตอร์กระแสสลับที่สภาวะต่างๆ ในการทดสอบการรบกวนระบบ (Disturbances) โดยจะแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ ที่กล่าวมาซึ่งจะเลือกใช้เฉพาะเพียงโพลต์ประเภทใด

ประเภทหนึ่งเท่านั้นในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัต นั้นจะทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ที่สภาวะของปัญหาแรงดันในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงในโรงงานมากที่สุดจำนวน 6 กรณีด้วยกัน

หลักการที่นำเสนอ

โครงสร้างการทำงานของวงจรกำลัง

วงจรกำลังของอุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตแสดงดังภาพที่ (1) ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน หม้อแปลงเชื่อมต่อแรงดันเฟสเดียว 3 ตัว และวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟอันดับที่ 2 โดยอุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตถูกติดตั้งอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกับโพลต์ R-L และมอเตอร์ โดยเชื่อมต่อกับระบบผ่านหม้อแปลง อุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตโดยพื้นฐานแล้วเป็นอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้การแปลงแรงดัน จากตัวเก็บประจุหรือแหล่งเก็บพลังงานชนิดอื่นแล้วส่งเข้าไปในระบบผ่านทางหม้อแปลงเพื่อแก้ไขความผิดปกติของแรงดัน หลักการชดเชยแรงดันของอุปกรณ์กึ่งแรงดันพลวัตประสิทธิภาพในการปรับปรุงกำลังไฟฟ้า เช่น แรงดันตกหรือดันเกินนั้น นอกจากสามารถแก้ไขหรือชดเชยได้อย่างถูกต้องและแม่นยำแล้วนั้นสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ระยะเวลาในการตอบสนองที่ต้องเร็วเพราะจะมีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมแบบเวลาจริงวิกฤติ (Critical real time control) ดังนั้น เพื่อที่จะลดการคำนวณและขั้นตอนการทำงานให้สั้นลงเพื่อที่จะให้ได้ผลตอบสนองที่เร็วยิ่งขึ้นหลักการแก้ไขปัญหาคณะภาพกำลังไฟฟ้านำเสนอนี้จะไม่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี ฟอรัลเทสคิว แต่จะใช้ทฤษฎีเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแหล่งจ่ายแรงดันที่สมดุล 3 เฟสดังภาพที่ (2) ในการหาค่าทิศทางแรงดันของเฟสA (V) ออกมาเท่านั้น แล้วปรับให้มีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดที่ต้องการจากนั้นใช้เป็นแรงดันอ้างอิง (Reference voltage) ให้กับตัวควบคุมแบบสไลด์โหมด เพื่อควบคุมแรงดันที่โพลต์ให้เท่ากับแรงดันอ้างอิง โดยไดอะแกรมการทำงานแสดงดังภาพที่ (3)

การสร้างแรงดันอ้างอิง

จากภาพที่ (2) ให้ $v_{aa}(t)$ คือแรงดันที่มีทิศทางเดียวกับ V_a ที่มีขนาดเท่ากับ V_{aa} ดังนั้น

$$v_{aa}(t) = V_{aa} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

โดยแรงดันที่มีทิศทางเดียวกับ V_a หาได้จากสมการที่ 2

$$v_{aa}(t) = v_{ab}(t) - v_{ca}(t) \quad (2)$$

โดยที่ v_{ab} และ v_{ca} คือแรงดันระหว่างสายชั่วขณะเวลาหนึ่ง

ขนาดของ V_{aa} สามารถคำนวณได้โดยอาศัยข้อมูลหน้าต่างช่วงสั้น (Short time window) โดยสุ่มตัวอย่างข้อมูลสัญญาณ $v_{aa}(t)$ มาใช้ 2 ตัวอย่างตามสมการที่ 3 [16]

$$V_{aa} = \frac{[v_{aa(k+1)}^2 + v_{aa(k)}^2 - 2v_{aa(k+1)}v_{aa(k)} \cos(\omega T_s)]^{0.5}}{\sin(\omega T_s)} \quad (3)$$

โดยที่ $v_{aa(k+1)}$ และ $v_{aa(k)}$ คือแรงดันของ v_{aa} ที่เวลา $t_{(k+1)}$ และ $t_{(k)}$ ตามลำดับ

T_s เป็นช่วงเวลาของการสุ่มตัวอย่างซึ่งเท่ากับ $t_{(k+1)} - t_{(k)}$

แรงดันอ้างอิงทั้งสามเฟสสำหรับตัวควบคุมแบบสไลด์ิงโหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) กับ (5) โดย v_{ref} เป็นแรงดันที่มีทิศทางเดียวกันกับ v_{aa} แต่มีขนาดเท่ากับพิกัดแรงดัน (V_{rated})

$$v_{ref}(t) = \frac{V_{rated}}{V_{aa}} \times v_{aa}(t) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} v_{refA} \\ v_{refB} \\ v_{refC} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{ref} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

V_{rated} คือขนาดของแรงดันพิกัดของโหลด $\alpha = e^{j2\pi/3}$ เป็นตัวปฏิบัติการเลื่อนเฟสไป

120° (120° phase-shift operator)

จากสมการที่ (4) กับ (5) จะเห็นได้ว่าการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงเฉพาะเฟส A เท่านั้น ส่วนเฟส B และ C นั้นหาได้จากเฟส A โดยการเลื่อนเฟสไป 120°

ตัวควบคุมแบบสไลด์ิงโหมด

แรงดันอ้างอิงจากสมการที่ 5 ถูกนำมาในการเปรียบเทียบกับแรงดันโหลด ก่อนที่จะป้อนให้กับตัวควบคุมแบบสไลด์ิงโหมดดังภาพที่ (3) และจะจรการควบคุมสไลด์ิงโหมดสำหรับการจำลอง (Matlab Simulink) แสดงดังภาพที่ (5)

กฎการควบคุมของสไลด์ิงโหมดเป็นไปตามสมการที่ (6) หรือ (7) [17]

$$u(t) = -\rho \operatorname{sgn}(s(x,t)) \quad (6)$$

$$\text{หรือ } u(t) = \begin{cases} -\rho & \text{if } s(x,t) > 0 \\ \rho & \text{if } s(x,t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

โดย ρ คือการขยายสัญญาณสไลด์ิง (Sliding gain)

$\operatorname{sgn}(\cdot)$ คือซิกนัม (Signum) หรือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย (Sign function)

ฟังก์ชันสวิตช์ (Switch function), $s(x,t)$ หาได้จากสมการที่ (8)

$$s(x,t) = e \quad (8)$$

โดย e คือ Tracking error ซึ่งเท่ากับ

$v_{load} - v_{ref}$
 x คือ สภาวะ (State) ของระบบ

การกำเนิดสัญญาณ PWM

การกำเนิดสัญญาณเกตของตัวอุปกรณ์กึ่งตัวนำแรงดันพลวัตนั้นได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่มาจากตัวควบคุมแบบสไลด์ิงโหมดกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 6 kHz ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ความถี่ 6 kHz เพื่อไปสวิตช์อินเวอร์เตอร์ดังภาพที่ (6)

การออกแบบวงจรกำลังไฟฟ้า

ในการวัดปริมาณความผิดพลาดของระบบจะใช้ดัชนีความผิดพลาดสองค่าคือ

1. แพลคเตอร์ความไม่สมดุล (Unbalance factor, UF) ใช้วัดปริมาณความมากน้อยของความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าสามเฟส คือ อัตราส่วนระหว่างผลบวกของแรงดันลำดับศูนย์ (V_0) และแรงดันลำดับลบ (V_2) ต่อแรงดันลำดับบวก (V_1) ดังสมการที่ (9)

$$UF = \frac{V_0 + V_2}{V_1} \quad (9)$$

2. แพลคเตอร์ขนาด (Magnitude factor, MF) วัดปริมาณแรงดันตกหรือเกินในระบบคือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันลำดับบวกต่อแรงดันพิกัด ดังสมการที่ (10)

$$MF = \frac{V_1}{V_{rated}} \quad (10)$$

หม้อแปลง

หม้อแปลงทำหน้าที่แยกอินเวอร์เตอร์ PWM ออกจากระบบไฟฟ้าและยังเป็นตัวเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายแรงดันและกระแสที่ต้องการชดเชยเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง แรงดันสูงสุดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเป็นไปตามสมการที่ (11)

$$V_{s,max} = \frac{(V_{rated} - V_1) + (V_0 + V_2)}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปของ MF และ UF ดังสมการที่ (12)

$$V_{s,max} = \left[\frac{1 - |MF|_{\min} (1 - |UF|_{\max})}{\sqrt{3}} \right] \cdot V_{rated} \quad (12)$$

แรงดันสูงสุดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับแรงดันมูลฐานสูงสุดของอินเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (13)

$$V_{p,max} = M \cdot \frac{V_{dc}}{2} = \frac{V_{dc}}{2}, \quad (M=1.0) \quad (13)$$

เมื่อ M คือ ดัชนีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ PWM

พิกัดพลังงานไฟฟ้าที่ปรากฏทั้งหมด (VA Rating) ของหม้อแปลงแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ $1/3$ ของพิกัดของอินเวอร์เตอร์โดยเป็นไปตามสมการที่ (14)

$$S_{\max} \left(\text{each TR} \right) = V_{s,\max} \cdot I_{rated} \quad (14)$$

เมื่อ I_{rated} คือ กระแสพิกัดโหลด

อัตราส่วนของหม้อแปลง (a) จะถูกเลือกให้สอดคล้องกับแรงดันบัลกรแสดงตรงของอินเวอร์เตอร์ V_{dc} และแรงดันพิกัดของโหลดที่เราต้องการ V_{rated} เป็นไปตามสมการที่ (15)

$$TR \text{ turn ratio}(a) = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_{dc}/2}{V_{rated}/\sqrt{3}} \quad (15)$$

พาสซีฟฟิลเตอร์สำหรับการกรองแรงดันกระแสเพื่อ

ดังแสดงในภาพที่ (7) หน้าที่ของ L_r และ C_r ที่ต่ออยู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีวัตถุประสงค์เพื่อกรองแรงดันกระแสเพื่อ (Voltage ripples) เนื่องมาจากการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ PWM ดังแสดงในภาพที่ (7) แสดงวงจรสมมูลของการสวิทช์ที่ทำให้เกิดแรงดันกระแสเพื่อ V_r

Z_{pwm} คือ แอิมปีจูดของผลรวมของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย Z_s และอิมพีแดนซ์โหลด Z_L ซึ่งจะถูกเห็นจากด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงดังแสดงในสมการ (16)

$$Z_{pwm} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (Z_s + Z_L) \quad (16)$$

ความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมจะเป็นไปตามสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวกรอง ซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ (17)

$$X_{crf} \ll X_{lrf} \ll Z_{pwm} \quad (17)$$

เมื่อ X_{crf} และ X_{lrf} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์และตัวเหนี่ยวนำของตัวกรองการ

กระเพื่อมตามลำดับ

เกณฑ์การออกแบบสำหรับ X_{crf} และ X_{lrf} ต้องทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่รีปเปิ้ลต้องมากกว่าแรงดันตกคร่อมในตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามความถี่ต้องถูกชดเชย แรงดันในตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่กว่าแรงดันในตัวเหนี่ยวนำ

กรณีศึกษาการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตด้วยตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด

ในการพิสูจน์ความถูกต้องของวิธีการของหลักการชดเชยแรงดันที่นำเสนอตั้งกล่าวข้างต้น โดยแแกรมการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตตามภาพที่ 1 และตัวอย่างการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบดัง (ตารางที่ 1) ได้ถูกใช้ในการจำลองระบบคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม แมทแลป-ซิมูลิงค์ (Matlab Simulink) ซึ่งจะทำทดสอบโดยกำหนดค่าระยะเวลาผิดพร่อง (Time Fault Duration) ของแหล่งจ่ายตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

ในการทดสอบการทำงานของตัวกักเก็บแรงดันพลวัตจะจำลองสถานะผิดพร่องของแรงดัน 6 กรณีโดยทุกกรณีอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตจะเริ่มต้นการชดเชยแรงดันที่เวลา 15 ms ดังนี้

กรณีที่ 1 Balance voltage sags ที่มี $|MF| = 0.40$

(โหลด R-L + มอเตอร์ M1 ที่สภาวะมีโหลด)

กรณีที่ 2 Unbalance voltage sags ที่มี $|MF| = 0.38$ และ $|UF| = 0.20$ (โหลด RL + มอเตอร์ M1 ที่สภาวะ มีโหลด)

กรณีที่ 3 Balance voltage swell ที่มี $|MF| = 1.40$

(โหลด R-L + มอเตอร์ M1 ที่สภาวะมีโหลด)

กรณีที่ 4 Unbalance voltage swell ที่มี

$|MF| = 1.30$ และ $|UF| = 0.40$ (โหลด R-L + มอเตอร์ M1 ที่สภาวะ มีโหลด)

กรณีที่ 5 1-phase loss แรงดันแหล่งจ่ายเฟส A หายไป ที่มี $|MF| = 0.65$ และ $|UF| = 0.57$ (โหลด R-L + มอเตอร์ M1 ที่สภาวะมีโหลด)

กรณีที่ 6 ทดสอบประสิทธิภาพของระบบการทำงานด้วยโหลดตามตารางที่ 2 $|MF| = 0.70$

(กรณีนี้เป็นการทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตโดยค่อยๆ เพิ่มโหลดเข้าไปในระบบในช่วงเวลาต่างๆ อย่างต่อเนื่องตามตารางที่ 2 เพื่อจำลองสถานการณ์ให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมและทดสอบการรบกวนระบบ

ผลการจำลองทั้ง 6 กรณี แสดงดังภาพที่ 8-13 ตามลำดับ และตัวอย่างคำสั่งสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมสไลด์ดิ้งโหมดเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Sags) แรงดันเกินชั่วขณะ (Swells) และสัญญาณขับเกตของอินเวอร์เตอร์แสดงดังภาพที่ 14-16 ตามลำดับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการจำลองในกรณีที่ 1-5 ดังแสดงในภาพที่ (8-12) พบว่าอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตสามารถแก้ไขความผิดปกติของแรงดันได้ทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแรงดันตก แรงดันเกิน แรงดันไม่สมดุล หรือการขาดหายไปแรงดัน ภายในเวลาไม่เกินหนึ่งส่วนสี่ของรูปคลื่นของแรงดัน (<5 ms) ซึ่งแสดงชัดเจนถึงผลตอบสนองที่รวดเร็วของวิธีการการชดเชยแรงดันที่นำเสนอ จากรูปจะเห็นว่าแรงดันชดเชย (Compensating voltage) ที่อุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตสร้างขึ้นมาจะสอดคล้องกับความผิดปกติของแรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ขณะที่แรงดันโหลด (Load voltage) ถูกรักษาให้คงที่ที่แรงดันพิกัด 220V (Rms) หรือ 311V (Peak-to-peak) ได้อย่างแม่นยำ

จากผลการจำลองในกรณีที่ 6 ดังแสดงภาพที่ 13 ซึ่งแรงดันแหล่งจ่ายเกิดการตกที่ $|MF| = 0.7$ พบว่า ในช่วงที่ 1 ซึ่งโหลดประกอบด้วยอาร์-แอลและมอเตอร์ M1 (4 KW) ทำงานที่สภาวะไร้อะไรโหลด เมื่ออุปกรณ์กักแรงดันพลวัตเริ่มทำงานที่เวลา 15 ms ก็สามารถชดเชยแรงดันโหลดให้อยู่ที่พิกัดได้ภายในเวลาไม่เกินหนึ่งส่วนสี่ของรูปคลื่น (< 5 ms) เมื่อมอเตอร์ M1 รับโหลดที่เวลา 60-90 ms ก็ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ฯ ต่อมาเมื่อทำการใส่มอเตอร์ขนาดใหญ่ M2 (8 KW) ขณะรับโหลดเข้าไปในระบบที่เวลา 90 ms จะเห็นว่าแรงดันแหล่งจ่ายเกิดการตกลงชั่วขณะประมาณ 1.5 รูปคลื่น เริ่มที่เวลา 92.5 ms สิ้นสุดที่เวลา 117.5 ms แต่อุปกรณ์กักแรงดันพลวัตก็ยังคงสามารถรักษาแรงดันโหลดให้คงที่ที่พิกัดได้ตามปกติซึ่งแสดงถึงความสามารถของตัวควบคุมแบบสไลด์จิ้งโหมดในการจัดการกับสิ่งรบกวนหรือสภาวะของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [15] ซึ่งนำเสนอการควบคุมแบบสไลด์จิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กักแรงดันพลวัตโดยการแปลงฟูเรียร์ในการสร้างแรงดันอ้างอิง จะพบว่าผลตอบสนองที่ได้มีความเร็วใกล้เคียงกันที่ไม่เกินหนึ่งส่วนสี่ของรูปคลื่น แต่อย่างไรก็ตามโหลดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยโหลดอาร์-แอลและมอเตอร์ซึ่งมีพลวัตมากกว่าที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยใน [15] ที่ใช้เพียงเฉพาะโหลดอาร์-แอล และเมื่อมีการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการผลของการหน่วงเวลาจากการคำนวณเชิงตัวเลขในไมโครโปรเซสเซอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้จะปรากฏชัดขึ้นในงานประเภทที่เป็นการควบคุมแบบเวลาจริงวิกฤติ ซึ่งโดยหลักการตัวควบคุมจะต้องกำเนิดสัญญาณชดเชยแรงดันทันทีทันใดจึงจะทำให้เกิดการชดเชยแรงดันได้อย่างสมบูรณ์แบบ

สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์จิ้งโหมดกับการกำเนิดแรงดันอ้างอิงที่ใช้หลักการของเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันสามเฟสสามารถปรับปรุงและแก้ไขความผิดปกติของแรงดันไม่ว่าจะเป็นแรงดันตกแรงดันเกิน แรงดันไม่สมดุล หรือการขาดหายไปแรงดัน ให้กลับสู่สภาวะปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพพร้อมทั้งแสดงให้เห็นว่าหลักการชดเชยแรงดันที่ไม่อยู่บนพื้นฐานของการแยกส่วนประกอบที่สมมาตรทำให้ลดภาระการคำนวณและส่งผลให้มีผลตอบสนองที่เร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบอย่างชัดเจนซึ่งไม่ว่าโหลดจะเป็นแบบคงที่และแบบไม่คงที่หรือมีการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนแปลงของโหลดก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวกักแรงดันพลวัต ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอตั้งพิสูจน์ให้เห็นจากผลการจำลองทั้ง 6 กรณีข้างต้น

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอหลักการและทฤษฎีในการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลด์จิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กักแรงดันพลวัต ซึ่งได้พิสูจน์ความเป็นไปได้โดยใช้โปรแกรมจำลองในแมทแล็บ-ซิมูลิงค์ โดยผลที่ได้สามารถชดเชยแรงดันที่ผิดปกติของแหล่งจ่ายได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ ตามหลักการและทฤษฎีทุกประการ อย่างไรก็ตาม จากผลที่ได้จะสังเกตเห็นว่าแรงดันของโหลดจะมีสัญญาณความถี่สูงปรากฏอยู่ ซึ่งเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกที่สร้างขึ้นมาโดยตัวอินเวอร์เตอร์ และจะต้องคำนึงถึงและได้รับการแก้ไขในอนาคต นอกจากนี้ ทฤษฎีและหลักการดังกล่าวยังไม่ได้มีการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง โดยอาจจะมีอุปกรณ์บางอย่างต้องได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ เช่น หม้อแปลงเชื่อมต่อ ตัวกรองสัญญาณริปเปิ้ล (Ripple filter) ซึ่งทำงานที่สัญญาณความถี่สูง และอาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการชดเชยแรงดันของตัวควบคุมที่นำเสนอได้

เอกสารอ้างอิง

1. Edward RW. Power quality issues- standards and guidelines. *IEEE Transactions on Industry Applications* 1996; 32:625-632.
2. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159-1995. 1995; 15-20.
3. Souto OCN, Oliveira deJC, Ribeiro PF, Neto LM. Power quality impact on performance and associated cost of three-phase induction motor. *Proc. Harmonics and Quality of Power* 1998; 2:791-797.
4. Nielsen JG, Blaabjerg F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers. *IEEE Trans.Ind* 2005; 41:1272-1280.
5. Fitzer C, Barnes M. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2004; 40:203-212.
6. Abdollahzadeh H, Jazaeri M, Tavighi A. A new fast-converged estimation approach for dynamic voltage restorer (DVR) to compensate. *Voltage Sags in Waveform Distortion Conditions. Electrical Power and Energy Systems* 2014; 54:598-609.
7. Girgis AA, Chang WB, Makram EB. A digital recursive measurement scheme for online tracking of power system harmonics. *IEEE Trans. Power Del* 1991; 6:1153-1160.
8. Bok J, Drapela J. A voltage event recorder for more accurate analysis of voltage events in power supply systems. *IEEE* 2011:1-7.
9. Moschitta A, Carbone P, Muscas C. Performance comparison of advanced techniques for voltage dip detection. *IEEE* 2012; 61:1494-1502.
10. Singh M, Chacko ST, Zadgaonkar AS. Detection of voltage sag by artificial neural network and mitigation using DSTATCOM; *Proceeding of the 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*; 2012
11. Fitzer C, Barnes M, Green P. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer. *IEEE* 2002; 917-924.
12. Jing W, Aiqin X, Yueyue S. A survey on control strategies of dynamic voltage restorer. *Proceeding of the 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*; 2008
13. Jurado F. Neural network control for dynamic voltage restorer. *Proceeding of IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON 02)*; 2002.
14. Jurado F, Valverde M. Operation of the dynamic voltage restorer with fuzzy logic control. *Proceeding of the 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*; 2004. Xi'an, China. Xi'an Jiao tong University Press; 2004.
15. HadiEzaji A. Sheikholeslami, Ghatreh-samani A, et al. Dynamic voltage restorer using sliding mode control to improve power quality in distribution system, *Proceeding of 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering* 2012.

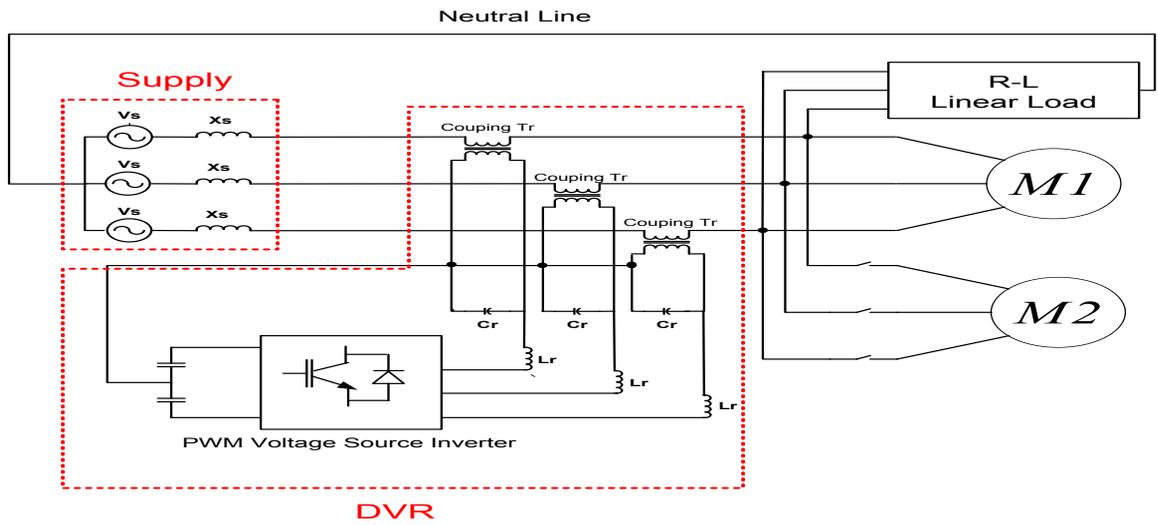
- 16 Kevork H, Geza J. A fast algorithm for voltage unbalance compensation and regulation in faulted distribution systems. IEEE-APEC Annual Meeting 1998: 963-969.
- 17 Isidori A. Nonlinear control systems. 3rd ed. Springer Verlag; 1999.

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์

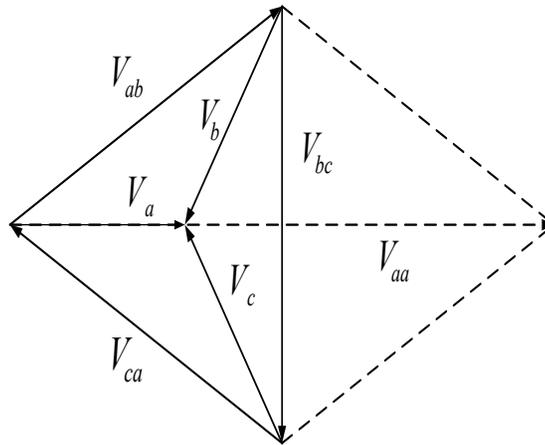
ความถี่แหล่งจ่าย		50 Hz
พิกัดแรงดันเฟสของโหลด		220 V (rms)
โหลดเชิงเส้น R-L		100 Ω
		1 H
อินดักชันมอเตอร์ M1		4KW
อินดักชันมอเตอร์ M2		8KW
อัตราส่วนของหม้อแปลง		1:1
แรงดันกระแสตรง (DC link)		$\frac{380\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 2$
ความถี่ในการสวิตช์อินเวอร์เตอร์		6 kHz
ตัวกรอง	ตัวเหนี่ยวนำ	1 mH
	ตัวเก็บประจุ	55 μ F

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาของโหลดที่ถูกใส่เข้าไปในระบบ

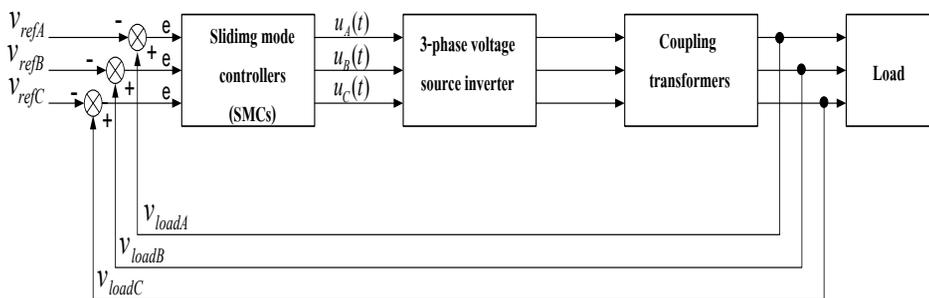
ช่วงเวลา	โหลด
ช่วงที่หนึ่ง 0-60 ms	R-L Linear Load + มอเตอร์อินดักชัน (M1) ที่สภาวะ ไร้โหลด
ช่วงที่สอง 60-90 ms	R-L Linear Load + มอเตอร์อินดักชัน (M1) ที่สภาวะมีโหลด
ช่วงที่สาม > 90 ms	R-L Linear Load + มอเตอร์อินดักชัน (M1) ที่สภาวะมีโหลด + มอเตอร์อินดักชัน (M2) ที่สภาวะมีโหลด



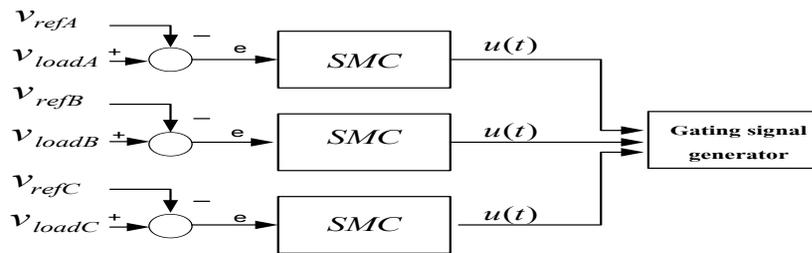
ภาพที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์ผู้คืนแรงดันพลวัต



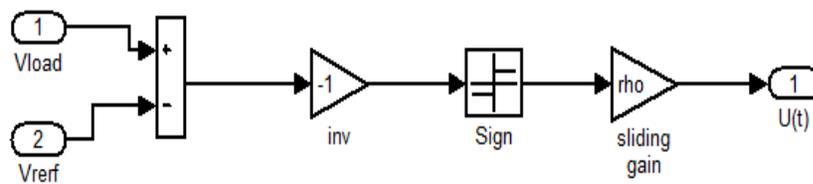
ภาพที่ 2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟสที่สมดุลในระบบ 3 เฟส



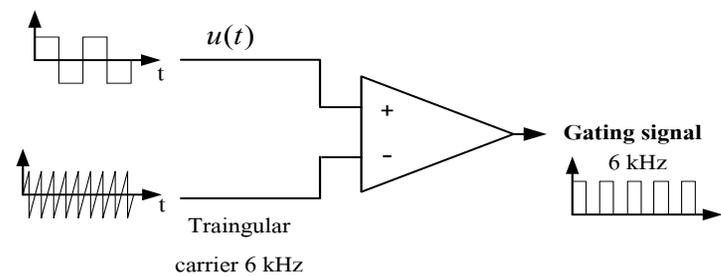
ภาพที่ 3 ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมการชดเชยแรงดันของตัวควบคุมแบบสไลด์ิงโหมด



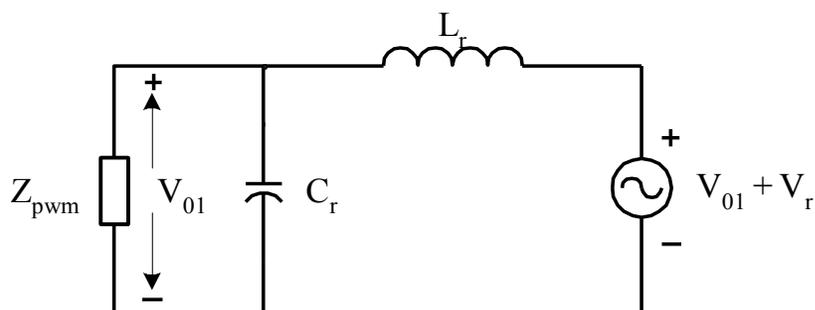
ภาพที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสไลด์จิงโหมด



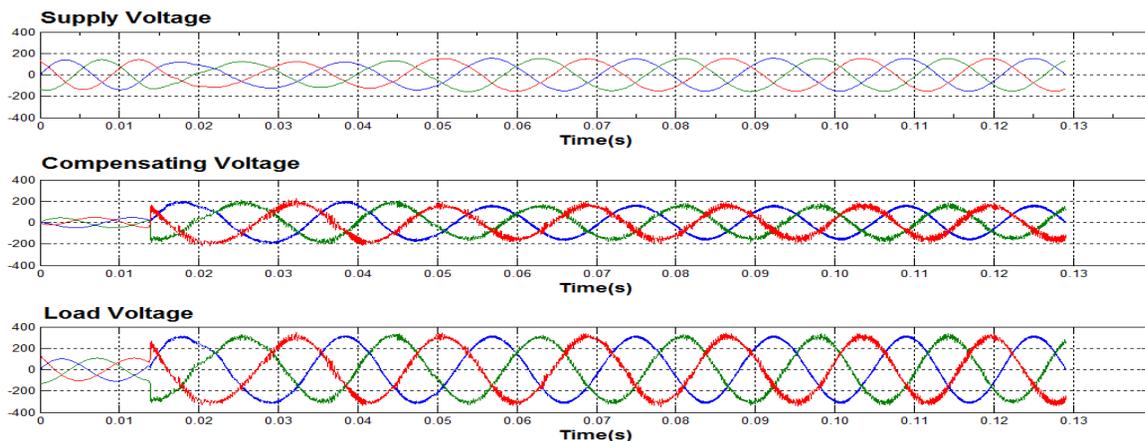
ภาพที่ 5 วงจรการควบคุมสไลด์จิงโหมด สำหรับการจำลอง (Matlab Simulink)



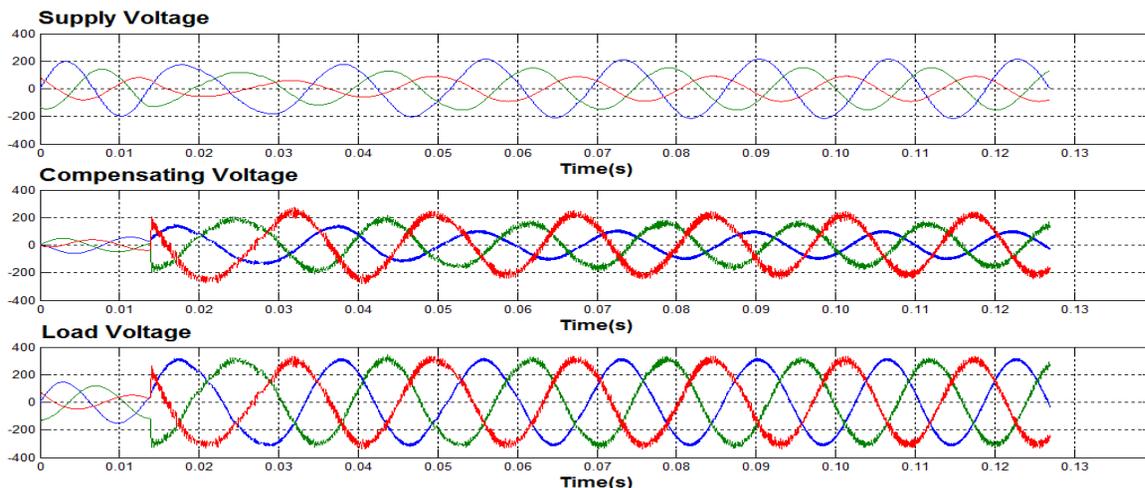
ภาพที่ 6 ไดอะแกรมของตัวกำเนิดสัญญาณเกต (Gating signal generator)



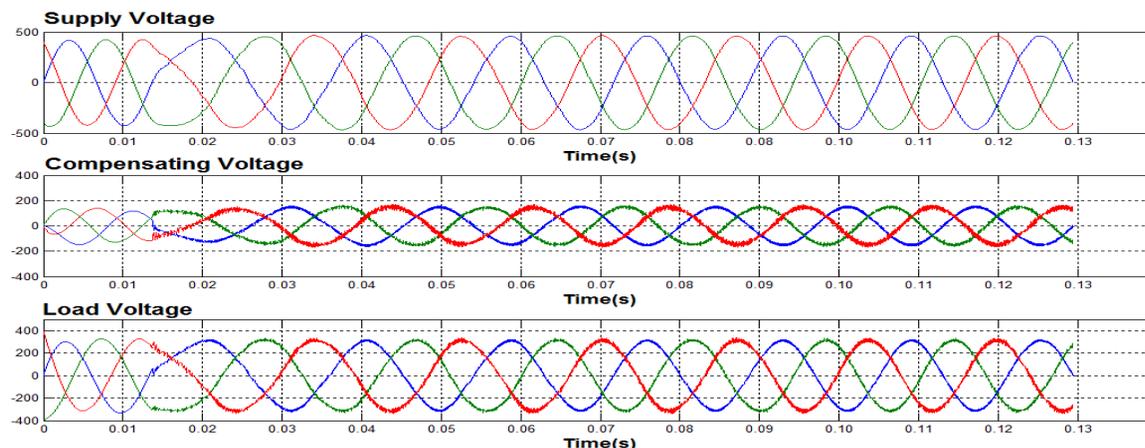
ภาพที่ 7 วงจรสมมูลแหล่งจ่าย ($V_{o1} + V_r$)



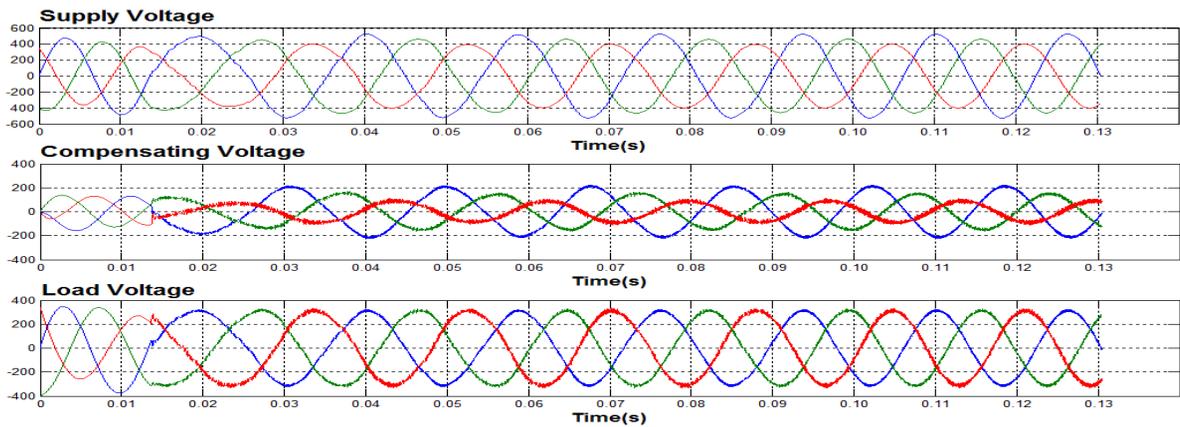
ภาพที่ 8 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดัน โหลดในกรณี ที่ 1



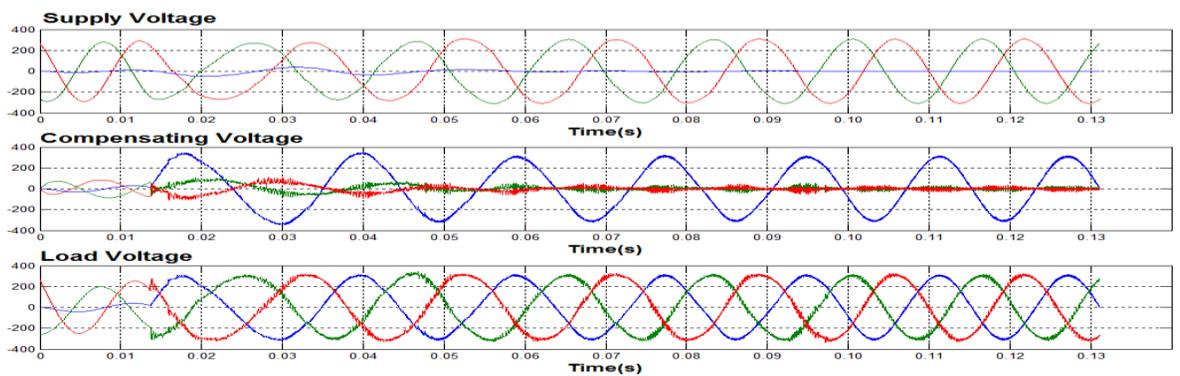
ภาพที่ 9 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดัน โหลดกรณี ที่ 2



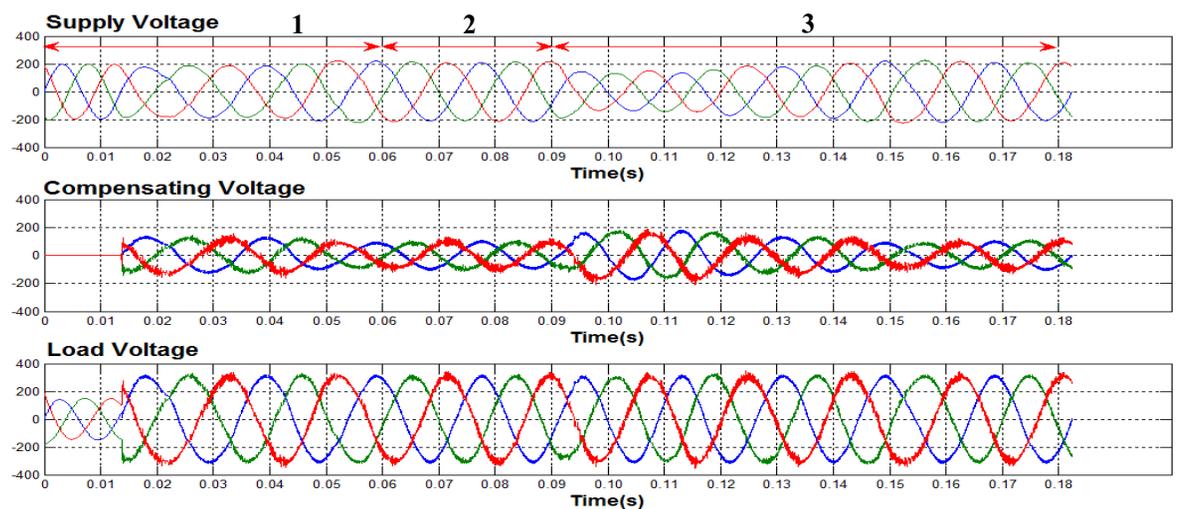
ภาพที่ 10 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดัน โหลดในกรณี ที่ 3



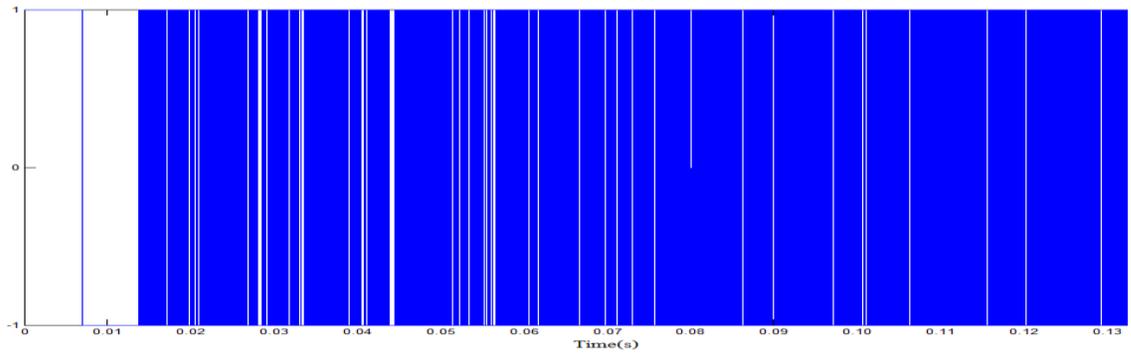
ภาพที่ 11 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 4



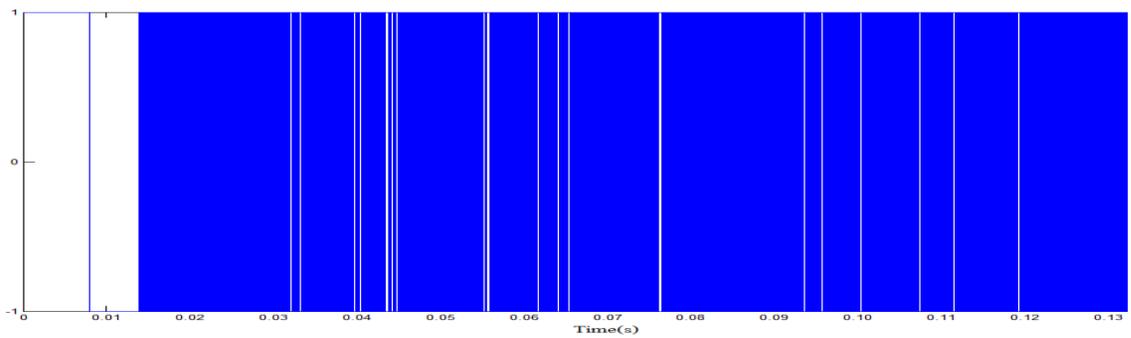
ภาพที่ 12 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 5



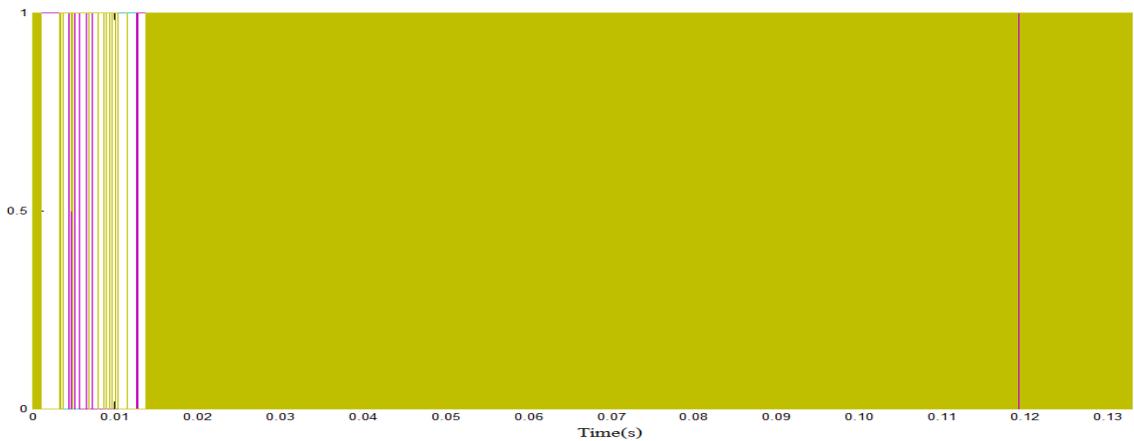
ภาพที่ 13 กราฟแสดงแรงดันแหล่งจ่าย แรงดันชดเชยและแรงดันโหลดในกรณีที่ 6 (1, 2, 3 คือ ช่วงเวลาของ โหลดที่ถูกใส่เข้าไปในระบบตามตารางที่ 2



ภาพที่ 14 แสดงค่าสั่งเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด กรณีแรงดันตก (Sags)



ภาพที่ 15 แสดงค่าสั่งเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด กรณีแรงดันเกิน (Swells)



ภาพที่ 16 แสดงค่าสั่งสัญญาณขั้วเกิดของแหล่งจ่ายแรงดันอินเวอร์เตอร์ ทั้ง 3 เฟส