PW2_9

(EN-116)

การเปรียบเทียบผลของการใช้งานหม้อแปลงสำหรับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

Comparison on the effect of Transformer applications connection in DVR

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 0-2549-3571 โทรสาร: 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) ขนาด 10 kVA พิกัดแรงดัน 380 V 3 เฟส ความถี่ 50 Hz โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำงานเมื่อใช้หม้อแปลงและเมื่อไม่ใช้หม้อแปลงต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า เพื่อแสดงว่าการทำงานเมื่อไม่ใช้หม้อแปลงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อใช้หม้อแปลง ซึ่งการทำงานเมื่อใช้หม้อแปลงจะมีผลกระทบในเรื่องของการเลื่อนเฟส และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการทำงานของ DVR แบบไม่ใช้หม้อแปลงมีขนาดใกล้เคียง 1.0 p.u. มากกว่าแบบใช้หม้อแปลง และก็ไม่มีผลของการเลื่อนเฟสมาเกี่ยวข้องด้วย นอกจากนั้นถ้าหากนำมาสร้างเป็นตัวอุปกรณ์จริงยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม, หม้อแปลงไฟฟ้า, แรงดันตกชั่วครู่

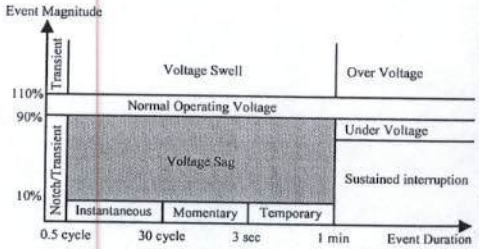
Abstract

This paper presents the analysis of DVR in 10 kVA 380 V 50 Hz Three-phase Dynamic Voltage Restorer. The comparison between with and without transformers is considered in this paper. The DVR operation with transformer has effect to output voltage waveform, according to the phase shift and voltage drop. The simulation results show that the magnitude of load voltage without the transformer about 1.0 p.u. more than with transformer. Moreover, it has not effect of phase shift and no voltage drop. This study can be ensured that the effect of transformer, that occurred on results, has to consider for DVR application.

Keywords: Dynamic Voltage Restorer, Transformer, and Voltage Sag

1. คำนำ

แรงดันตกชั่วครู่ (Voltage Sag) เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมเกิดปัญหาในขั้นตอนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังควบคุม โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการผิดพร่อง (fault) ในระบบไฟฟ้าและเมื่อเกิดปัญหานี้ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นที่จะต้องป้องกัน โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูง (sensitive load) รูปที่ 1 แสดงนิยามของแรงดันตกชั่วครู่ในระบบไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [1] โดยให้คำนิยามไว้ว่า แรงดันตกชั่วครู่ คือ การลดลงของขนาดแรงดันแหล่งจ่ายในช่วงเวลาสั้นๆ ตั้งแต่ครึ่งรูปคลื่น (0.5 วงรอบ) จนถึง 1 นาที และกลับสู่ค่าปกติ ซึ่งก็คือช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ ค่าประสิทธิผล (rms) ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.9 p.u. เมื่อเทียบกับพิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ 1 p.u. สาเหตุหลักๆ เกิดจากการเกิดการผิดพร่องในระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2 หรือเกิดจากการเริ่มเดินเครื่องของภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือขนาดและระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ขาดหายไปในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่เพื่อให้โหลดได้รับแรงดันปกติ (1.0 p.u.) ในอดีตที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมอย่างมากมาย เช่น การออกแบบโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบรอบเดียว ซึ่งสามารถควบคุมค่ายอดของแรงดันได้ แต่ความไวของการควบคุมไม่ดี และไม่ได้แสดงการควบคุมแบบละเอียดไว้ [2] ต่อมาได้มีการนำเสนอ DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับฉีดแรงดันและสามารถชาร์จตัวเก็บประจุ DC-link ด้วยตนเองเมื่ออยู่ในสภาวะปกติ กรณีที่ไม่มีหม้อแปลงจะช่วยลดขนาดของ DVR และค่าใช้จ่ายลงได้ [3] จากนั้นได้มีการนำเสนอ DVR แบบหลายฟังก์ชัน โดยใช้ทฤษฎี minimum energy [4] เพื่อลดกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการชดเชย มีการเปรียบเทียบวิธีการชดเชยแต่ละวิธี แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นผลของการชดเชยยังไม่ชัดเจน ถึงแม้ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้ แต่ก็ยังมีความไม่ชัดเจนในส่วนตัวควบคุมของ

DVR จึงได้มีการพยายามที่จะลดความยุ่งยากของอัลกอริทึมในส่วนของการควบคุม DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับฉีดแรงดัน [5]

จากการศึกษาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่แล้วจะไม่ค่อยพูดถึงผลของหม้อแปลงและถึงแม้จะมีการพูดถึงแต่ก็ยังไม่มีการนำมาเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ใช้หม้อแปลง เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าคือทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (phase shift) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (voltage drop) นอกจากนั้นการเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงและกระแสอินรัช (inrush current) ซึ่งทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดเป็น 2 เท่าของพิกัดตัวชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ [5] ดังนั้นบทความนี้จึงต้องการนำเสนอการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมที่มีการใช้หม้อแปลงกับวิธีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง พร้อมแสดงให้เห็นว่าวิธีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรงนั้นสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมได้ โดยมีการนำเสนอเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

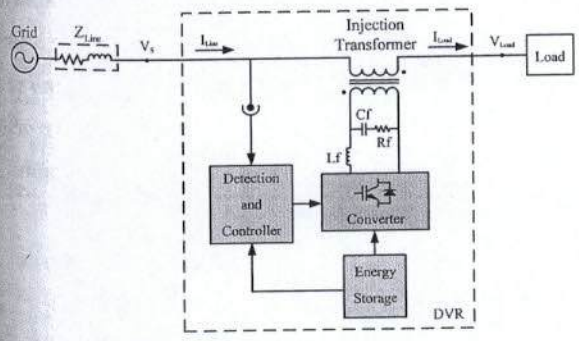
2. การชดเชยแรงดันตกชั่วครู่

2.1 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR)

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกแบบอนุกรมหรือ DVR โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนแปลงพลังงาน ส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน และส่วนการควบคุมดังรูปที่ 2 สำหรับวิธีการชดเชยแรงดันของ DVR มี 3 วิธี [6] คือ

1. Pre-Sag Compensation
2. in-Phase Compensation
3. Energy Optimization Technique

สำหรับบทความนี้จะเลือกใช้วิธีการชดเชยแบบที่ 1 ซึ่งสามารถชดเชยได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดัน



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

2.2 การควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจาก เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วครู่ในระบบ ส่วนตรวจจับก็จะตรวจสอบว่าเกิดแรงดันตกชั่วครู่จริงหรือไม่ เมื่อมีสัญญาณว่าเกิดแรงดันตกชั่วครู่แล้วส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงก็จะทำการสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันจริงในระบบ จากนั้นก็จะนำแรงดันที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ไปมอดูลเลตความกว้างพัลส์ (PWM) เพื่อขับนำคอนเวอร์เตอร์ให้ฉีดแรงดันเข้าสู่ระบบ บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจาก DVR ไปยังระบบไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลด หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดพันอยู่บนแกนเหล็กซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4 [7] จากวงจรสมมูลดังกล่าวจะได้

$$X_0 = E_1 / I_\mu \tag{1}$$

$$R_0 = E_1 / I_\omega \tag{2}$$

$$Z_m = R_0 // X_0 \tag{3}$$

$$Z_1 = R_1 + X_1 \tag{4}$$

จาก $E_2 / E_1 = N_2 / N_1 = a$ นั้น สามารถย้ายค่าต่างๆจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4 เมื่อย้ายขดทุติยภูมิไปทางด้านขดปฐมภูมิ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ย้ายจากขดทุติยภูมิไปทางด้านขดปฐมภูมิสามารถหาได้จากสมการที่ (5)-(8)

$$I_2' = aI_2 \tag{5}$$

$$V_2' = V_2 / a \tag{6}$$

$$R_2' = R_2 / a^2 \tag{7}$$

$$X_2' = X_2 / a^2 \tag{8}$$

จากวงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถหาค่า V_2' จากอัตราส่วนของแรงดันได้ดังนี้คือ

$$V_2' = \left(\frac{I_2' Z_2'}{I_1 Z_1 + I_0 Z_m} \right) V_1 \tag{9}$$

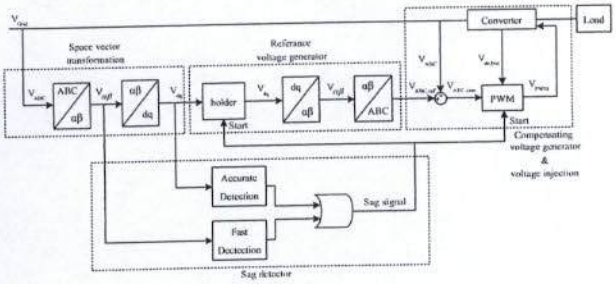
การใช้หม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (phase shift) และแรงดันตกคร่อม (voltage drop) ซึ่งเป็นข้อเสียของหม้อแปลง นอกจากนั้นการเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงและกระแสอินรัช (inrush current) ซึ่งทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดเป็น 2 เท่าของพิกัดตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม เป็นผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และราคาสูง

2.4 กระแสอินรัช (inrush current) [9]

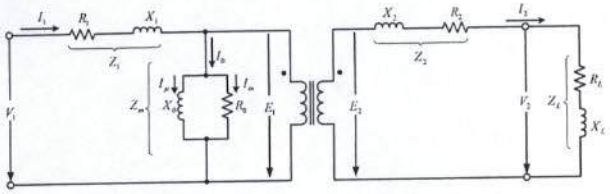
เมื่อมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงกับแหล่งจ่ายกระแสสลับในช่วงแรกจะมีเสิร์จของกระแสไหลเข้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิที่เรียกว่ากระแสอินรัช (inrush current) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายโดยฉับพลัน

PW2_9

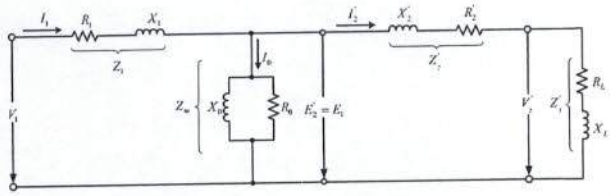
เมื่อเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงทั้งฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสในขดลวดจะเริ่มต้นที่ศูนย์และค่อยๆเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6



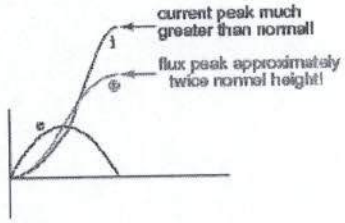
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม



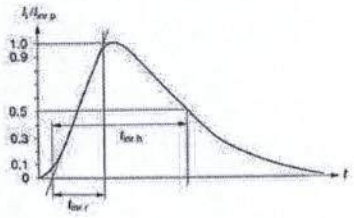
รูปที่ 4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



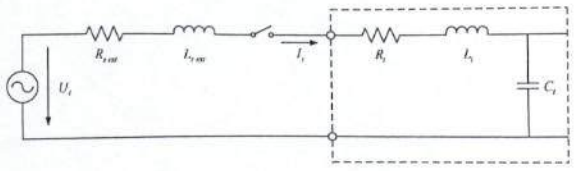
รูปที่ 5 วงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 6 รูปคลื่นกระแส ฟลักซ์และแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง



รูปที่ 7 รูปคลื่นของกระแสอินรัช



รูปที่ 8 วงจรของการเกิดกระแสอินรัช

ดังนั้นในหม้อแปลงไฟฟ้าตอนเริ่มต้นฟลักซ์จะมีขนาดประมาณสองเท่าของค่าสูงสุดของขนาดปกติ เนื่องจากผลรวมของพื้นที่ภายใต้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลแรก (first half-cycle) ในหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติกระแสในแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าของค่าสูงสุดของกระแสตามปกติเช่นกัน เนื่องจากการสร้าง magnetomotive force (mmf) ซึ่งทำให้ฟลักซ์สูงกว่าปกติ กระแสขดลวดที่สร้าง mmf จะทำให้เกิดฟลักซ์ในขดลวดเพิ่มมากขึ้นมากกว่าสองเท่าของค่าสูงสุดของฟลักซ์ปกติ

นี่จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงที่มีพิกัดเป็น 2 เท่าของพิกัดตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมนั่นเอง ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กในช่วงเวลาของการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายอาจทำให้กระแสอินรัชมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นได้ จากรูปที่ 7 และ 8 สามารถหาค่าสูงสุดของกระแสอินรัช ($I_{inr\,p}$) ได้จากสมการที่ (10) [10]

$$I_{inr\,p} < \frac{U_i}{R_{s\,ext} + R_i} \tag{10}$$

เวลาที่เพิ่มขึ้นของ $t_{inr\,r}$ หาได้จากสมการที่ (11)

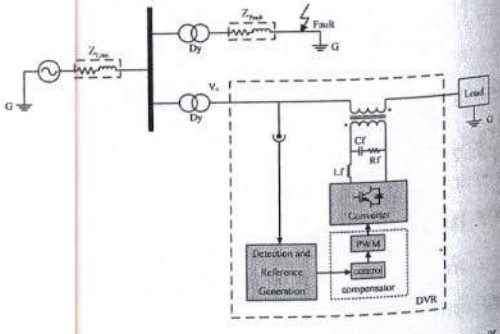
$$t_{inr\,r} \approx \frac{L_{s\,ext} + L_i}{R_{s\,ext} + R_i} \tag{11}$$

เวลาที่ค่าครึ่งหนึ่งของ $t_{inr\,h}$ หาได้จากสมการที่ (12)

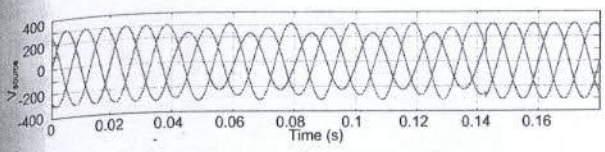
$$t_{inr\,h} \approx 0.7 \times (R_{s\,ext} + R_i) \times C_i + t_{inr\,r} \tag{12}$$

3. การจำลองการทำงาน

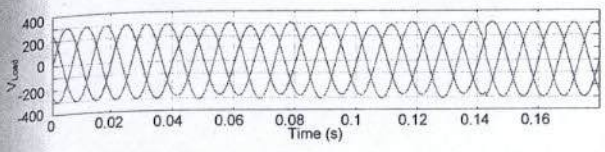
การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จะนำอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมต่อเข้าไปทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในระบบจำหน่าย ดังรูปที่ 9 โดยกำหนดให้การผิดพร่องในระบบไฟฟ้าเกิดที่วินาทีที่ 0.04 เป็นเวลา 0.1 วินาที แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสมีค่า 380 V ที่ความถี่ 50 Hz ใช้ความถี่การสวิตช์ 20 kHz $C_f = 8\mu F$, $L_f = 2mH$, $R_f = 32\Omega$, $C_{bus} = 6{,}600\ \mu F$ เงื่อนไขการเกิดแรงดันตกชั่วขณะแรงดัน $|V| \le 198$ V ในการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส $\Delta\theta > 1.85°$ หรือ $\Delta\theta < 1.75°$ และใช้โหลด RL ซึ่งมีค่า 13 Ω และ 19 mH ต่ออนุกรมกัน



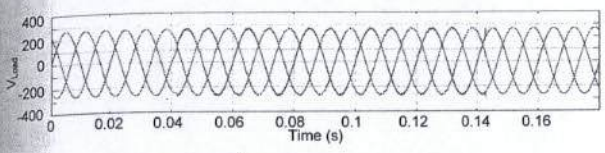
รูปที่ 9 วงจรการจำลองการทำงานแบบใช้หม้อแปลงฉีดแรงดัน



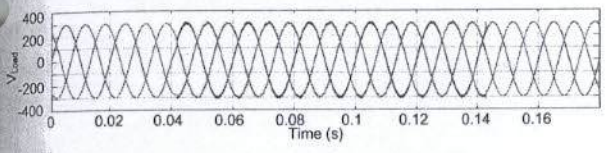
(ก) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่



(ข) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่าน้อย)

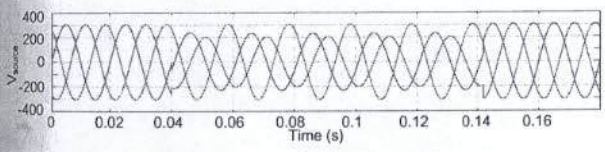


(ค) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่ามาก)

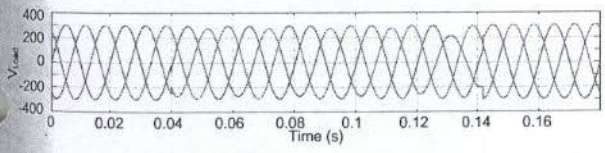


(ง) การชดเชยด้วย DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลง

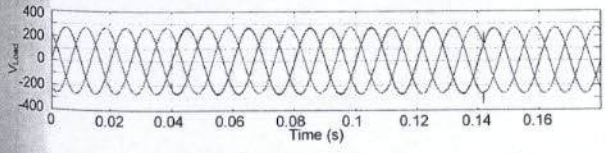
รูปที่ 10 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม กรณีเกิดความผิดพร่องแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์



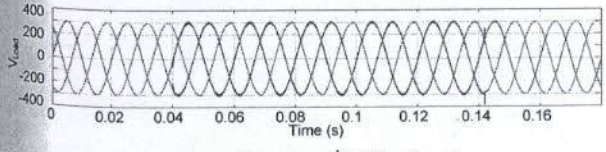
(ก) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่



(ข) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่าน้อย)



(ค) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่ามาก)



(ง) การชดเชยด้วย DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลง

รูปที่ 11 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม กรณีเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A กับ B

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของ DVR โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำงานเมื่อใช้หม้อแปลงและไม่ใช้หม้อแปลงต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จากผลการจำลองพบว่าการทำงานเมื่อไม่ใช้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าเมื่อใช้หม้อแปลง เนื่องจากแรงดันที่ได้หลังจากการติดตั้ง DVR มีค่าเข้าใกล้ 1.0 p.u. เมื่อเทียบกับแรงดันที่ระบบ 1.0 p.u. สำหรับการชดเชยเมื่อใช้หม้อแปลงนั้นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ DVR คืออิมพิแดนซ์ของหม้อแปลง ซึ่งถ้าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงมีค่ามากกระแสที่ตกค้างในหม้อแปลงก็จะมีค่ามากส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่หม้อแปลงมีค่ามากนั่นเอง ดังนั้นการเลือกขนาดของหม้อแปลงควรเลือกอิมพิแดนซ์ให้มีค่าน้อยๆ จะช่วยลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่หม้อแปลงได้ นอกจากนั้นหากนำไปสร้างเป็นตัวอุปกรณ์จริง การใช้ DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลงนั้นยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มทร. ธัญบุรี ที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลและสถานที่ และขอขอบพระคุณกองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของ กฟภ. ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยการสร้างต้นแบบ DVR เพื่อลดผลกระทบของแรงดันตกชั่วครู่

เอกสารอ้างอิง

[1] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standards on Power Quality, pp.12, June 14, 1995.

[2] Liu, J. W., Choi,S. S., & Chen, S., "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement", IEEE Transactions on Power Delivery. 18(4), 1403 – 1409, 2003.

[3] Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi, D. Mahinda Vilathgamuwa,"Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformerless Self-Charging Dynamic Voltage Restorer", IEEE Transactions on Power Delivery, 1511 – 1518, 2004.

[4] M.R.Banaei , A. Nahavandi, S. H. Hosseini., "Investigation of Multi-Functional DVR to Improve Power Quality Characteristic", ECTICON 6th, Pattaya Chonburi ,144 – 149, 2009.

[5] Kittiwat Chiangchin., "Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints", Thesis, Electrical Engineering, chulalongkorn university, 2006.

[6] วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์,"การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมขนาด 10 kVA โดยใช้คอนเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอด แคลมป์", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33) จังหวัดเชียงใหม่, หน้า 173-176, 1-3 ธันวาคม 2553

[7] ไชยชาญ หินเกิด "เครื่องกลไฟฟ้า 1" พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. , 2544

[8] Tony R. Kuphaldt "AC Theory-Table Of Contents" (http://www.opamp-electronics.com/tutorials/inrush_current_2_09_12.htm)

[9] Power-One "Power Supplies : Technical Information"