

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยวิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

COMPARATIVE STUDY ON THE EVALUATION OF IMPULSE VOLTAGE PARAMETERS BY THE KALMAN FILTER METHOD AND THE LEVENBERG-MARQUADT METHOD

นพดล โคตรพันธ์

หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

E-mail : eddy559@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิง จำนวน 14 กรณี จากโปรแกรม TDG โดยใช้วิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งงานวิจัยได้นำเสนอวิธีการหาค่าเริ่มต้นในการประดิษฐ์รูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการวิจัยพบว่า วิธีตัวกรองคาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ สามารถประเมินค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้องตามเกณฑ์มาตรฐาน IEC 61083 - 2 ทุกกรณี โดยวิธีตัวกรองคาลมานมีค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (ME) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (RMSE) ต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ แต่ใช้เวลาเฉลี่ยในการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นานกว่า

คำสำคัญ : วิธีตัวกรองคาลมาน วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ การหาค่าเริ่มต้น

ABSTRACT

This research has studied the evaluation on impulse voltage parameters. 14 cases on impulse voltage waveforms in TDG program have been used as references and compared by the Kalman Filter method and the Levenberg-Marquadt method. This methodology has presented the new initial value evaluation to access impulse voltage mean curve, which has differed from the previous works. As a result, both Kalman Filter and Levenberg-Marquadt method have precisely evaluated impulse voltage waveforms as IEC 61083 - 2 standard. The Kalman Filter method has obtained less Mean Error (ME) and Root Mean Square Error (RMSE) than the Levenberg-Marquadt method. However, Kalman Filter method has long-term period to examine the simulation results.

KEYWORDS : Kalman filter, Levenberg-marquadt, Impulse voltage parameter, Initial value

ความเป็นมาของปัญหา

การประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่มีภาวะรบกวน ได้แก่ การแกว่ง (Oscillation), ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) และสัญญาณรบกวน (Noise) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ อันได้แก่ ค่ายอด, เวลาหน้าคลื่นและเวลาหลังคลื่น จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน เมื่อดำเนินการโดยบุคคลทั่วไป ปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ โดยมีการใช้คอมพิวเตอร์ประดิษฐ์รูปคลื่นจำลอง เพื่อใช้เป็นตัวแทนรูปคลื่นจริง ซึ่งรูปคลื่นจำลองจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการและสมการคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60060-1 (IEC, 1989), IEC 60060-2 (IEC, 1996) และ IEC 61083-2 (IEC, 1996) กำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงที่สร้างโดยโปรแกรม TDG (Test Data Generator) จำนวน 14 กรณี (IEC, 1996) และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไว้ โดยผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์จากวิธีการต่างๆ ที่ผ่านมามีในอดีต พบว่ายังไม่มีวิธีการใดที่สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้องทั้ง 14 กรณี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างโปรแกรม สำหรับการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเลือกใช้วิธีการที่ดีที่สุด ในอดีต 2 วิธีการมาทำการเปรียบเทียบกัน เพื่อให้สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้อย่างถูกต้อง

ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน

งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

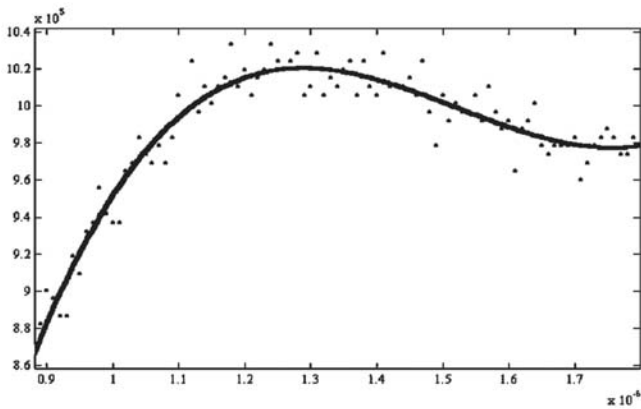
มาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พม่ามาตรฐานเป็น 1.2/50 μ s จากสมการเอกซโพเนนเชียลคู่ ดังนี้

$$M(t) = A(e^{\alpha(t-t_0)} - e^{\beta(t-t_0)}) \quad (1)$$

งานวิจัยในอดีต กำหนดค่าเริ่มต้นจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พม่ามาตรฐาน ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (1) คือ $A=1.03 \cdot U_{peak}$, $\alpha = -1/(68.5 \mu s)$ และ $\beta = -1/(0.405 \mu s)$ ในการเริ่มต้นคำนวณ ผู้วิจัยนำเสนองานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา เปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงกรณีที่ 9 (TDG9) เนื่องจากเป็นรูปคลื่นที่มีภาวะรบกวนครบถ้วน และภาวะรบกวนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

1. วิธีการ Cubic Spline Interpolation

(Wong, K. C. P.; et al., 1999: 193-196) ใช้วิธีการนี้ ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้สมการพหุนามกำลัง 3 ในภาพที่ 1 แสดงการประดิษฐ์รูปคลื่นบริเวณค่ายอดจำนวน 100 จุด โดยค่ายอดในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 1.015 MV ผิดพลาดไปจากค่าที่มาตรฐานกำหนด (0.96-0.99 MV) เนื่องจากสมการพหุนามไม่สามารถวิเคราะห์การแกว่งหรือส่วนพุ่งเกินได้



ภาพที่ 1 Cubic Spline กับรูปคลื่น TDG9

2. วิธีการของ Prony

วิธีการ Prony เป็นกระบวนการออกแบบตัวกรอง IIR ใช้การแปลงแซด (Z-Transform) จากสัญญาณเข้า เช่นสัญญาณแรงดันอิมพัลส์ (V(t)) แล้วหาสัมประสิทธิ์ของเศษส่วนในสมการ

$$V(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(m+1)z^{-m}} \quad (2)$$

(W. C. Boaventura, 2003 : 253-258) นำวิธีการนี้มาใช้ในการหาค่ายอด ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจากรูปคลื่น TDG กรณีที่ 14 ได้ผลถูกต้องตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยใช้สมการ

$$V_n = \sum_{m=1}^N A_m e^{s_m n t}, n = 0, 1, 2, \dots, 2N \quad (3)$$

ภาพที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบวิธีการ Prony กับรูปคลื่น TDG กรณีที่ 9 พบว่า ได้เวลาหน้าคลื่น 1.25 μ s ผิดไปจากเกณฑ์มาตรฐาน (1.0 - 1.1 μ s)

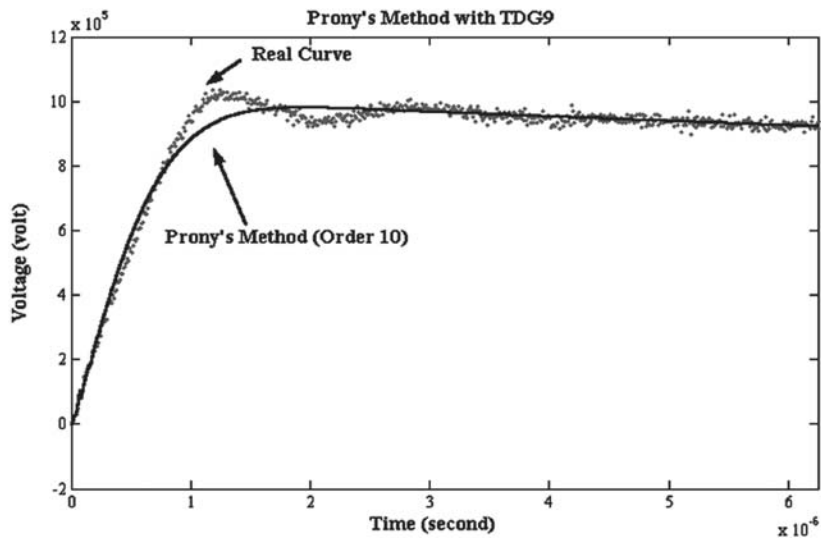
3. วิธีการ Genetic Algorithm

$$u(t) = (A_1 e^{-\alpha_1 t} - A_2 e A_1 e^{-\alpha_1 t}) + A_3 (1 - e^{-\alpha_3 t}) \cos(\omega t + \phi) \lambda(t_d) \quad (4)$$

วิธีการนี้ ใช้กรรมวิธีแบบสุ่มเลือกค่าตัวแปร ในสมการที่ 4 จากขอบเขตตัวแปรที่เป็นไปได้ (การเลือกตัวแปรสามารถเลือกโดยผู้ทดลองได้) เมื่อเปลี่ยนตัวแปรแล้ว จะทำการเปรียบเทียบกับรูปคลื่นเดิม โดยใช้เกณฑ์ค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจากสมการที่ 5

$$\text{Fitness} = \frac{F}{\sum \sqrt{[f(t) - O(t)]^2}} \quad (5)$$

(Wong, K. C. P.; et al., 1999: 193-196) ใช้วิธีการนี้ ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แล้วทำการทดสอบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการแกว่ง และไม่มีการแกว่ง ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ไม่มีการทดสอบกับโปรแกรม TDG



ภาพที่ 2 Prony's Method กับรูปคลื่น TDG9

4. วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ เป็นวิธีการหาค่าฟังก์ชันที่ต้องการ โดยกรรมวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีการพัฒนามาจากวิธีการของเกาส์-นิวตัน เพื่อหาค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นทั่วไปคือ

$$y(x) = f(x, \beta) + \varepsilon \quad (6)$$

$$\min \text{imize}[S] = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta_i))^2 \quad (7)$$

(Arne P. Brede, 1999: 74-77) ใช้วิธีการนี้ประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยใช้สมการแบบจำลองรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 4 รูปแบบได้แก่

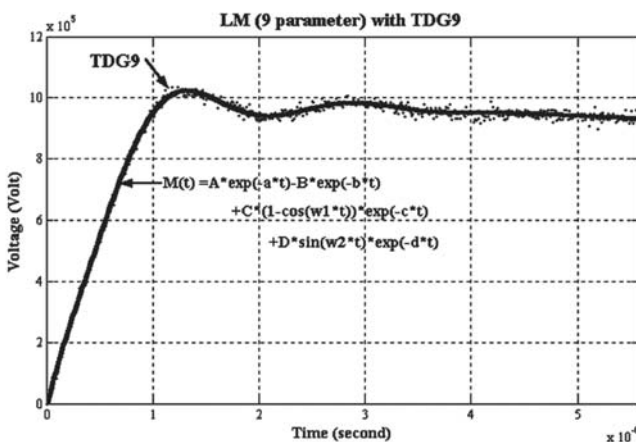
$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (8)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t))e^{-\gamma t} \quad (9)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + C \sin(\phi t)e^{-\delta t} \quad (10)$$

$$u(t) = A(e^{-at} - e^{-bt}) + B(1 - \cos(\omega t))e^{-\gamma t} + C \sin(\phi t)e^{-\delta t} \quad (11)$$

ทดสอบกับรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรม TDG พบว่าสมการที่ 11 มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบจากค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (RMSE) และสมการที่ 10, 9 และ 8 มีค่าผิดพลาดมากขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 3 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ กับ TDG9

5. วิธีตัวกรองคาลมาน

(Perez J. & Martinez J., 1995: 1713-1719) นำเสนอวิธีตัวกรองคาลมาน เป็นวิธีการกรองแบบดิจิทัลเชิงเส้นจากสมการสถานะทั่วไป

$$x(n+1) = Ax(n) + Bu(n) \quad (12)$$

$$y(n) = Cx(n) + Du(n)$$

เมื่อผ่านวิธีตัวกรองคาลมานแล้ว ตัวแปรที่ต้องการจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น คือ

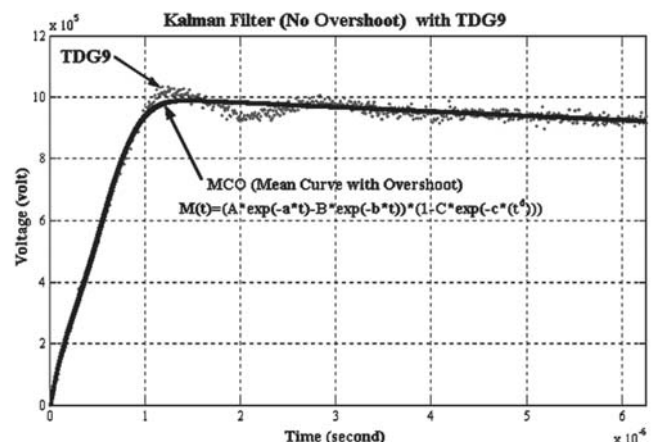
$$\hat{y}(n) = G_1 \hat{x}(n) + G_2 y(n) \quad (13)$$

(Perez J. & Martinez J., 1996: 1005-1014) ใช้วิธีตัวกรองคาลมานมาประดิษฐ์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยใช้สมการที่ 14

$$M(t) = A_0(e^{-a(t+t_0)} - Be^{-b(t+t_0)})(1 - B_1 e^{-c(t+t_0)^d}) \quad (14)$$

เมื่อทำการทดสอบ กับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงจากโปรแกรม TDG ทั้ง 14 กรณี พบว่าได้ค่าพารามิเตอร์ถูกต้องตามเกณฑ์มาตรฐานเป็นส่วนมาก ยกเว้นรูปคลื่นอ้างอิงกรณีที่ 14 ได้ค่ายอดและเวลาหน้าคคลื่นไม่ตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต การประดิษฐ์รูปคลื่นจำลองมีความแตกต่างเนื่องจากวิธีการและสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ ผู้วิจัยพบว่าสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ภาวะระบบวน คือสมการแบบจำลอง ควรเป็นสมการเอกซีโพเนนเชียลคู่ งานวิจัยในอดีต



ภาพที่ 4 วิธีการตัวกรองคาลมาน กับรูปคลื่น TDG9

ที่ผ่านมา วิธีการที่มีสมการแบบจำลองเป็นสมการเอกซิปโนเนนเชียลคู่ และมีค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้างต่ำที่สุด คือ "วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์" และวิธีการที่มีการทดสอบผลกับโปรแกรม TDG ถูกต้องมากที่สุดได้แก่ "วิธีตัวกรองคาลมาน" งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเลือกใช้อัลกอริทึมจากทั้งสองวิธีการ โดยเกณฑ์การเปรียบเทียบได้แก่

- ความถูกต้องโดยใช้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงจากโปรแกรม TDG ทั้งหมด 14 กรณี
- ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (ME) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (RMSE) เป็นเกณฑ์การเปรียบเทียบที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60060-1 ซึ่ง "รูปคลื่นตกค้าง" คือผลต่างระหว่างรูปคลื่นจริงกับรูปคลื่นเฉลี่ย
- เวลาที่ใช้ ในการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของสมการแบบจำลอง และวิธีการแบบต่างๆ ที่ใช้เพื่อประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านมาในอดีต
2. พัฒนาโปรแกรมประเมินค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้วิธีตัวกรอง คาลมานและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า เมื่อมีภาวะรบกวน

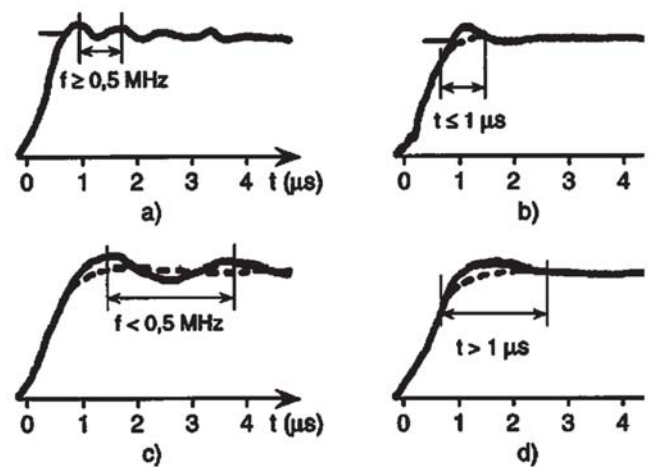
มาตรฐาน IEC 1083-2 กำหนดเกณฑ์ภาวะรบกวนของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานไว้ดังนี้

- สัญญาณรบกวน (Noise) น้อยกว่า 1% ของค่ายอดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- ความถี่หลักของการแกว่ง บนรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า มากกว่า 500 kHz
- ผลรวมของการแกว่ง และส่วนฟูงเกินน้อยกว่า 5% ของค่ายอดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- เวลาที่เกิดส่วนฟูงเกิน น้อยกว่า 1 μ s

ภาพที่ 5 แสดงพารามิเตอร์ของภาวะรบกวน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 ภาวะรบกวนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานให้คำนวณค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ย (เส้นประ) (ภาพที่ 5 (a), (b))

กรณีที่ 2 ภาวะรบกวนไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานให้คำนวณค่าพารามิเตอร์จากรูปคลื่นจริง (เส้นทึบ) (ภาพที่ 5 (c), (d))



ภาพที่ 5 แสดงพารามิเตอร์ของภาวะรบกวน

2. การหาค่าเริ่มต้นเพื่อคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ย

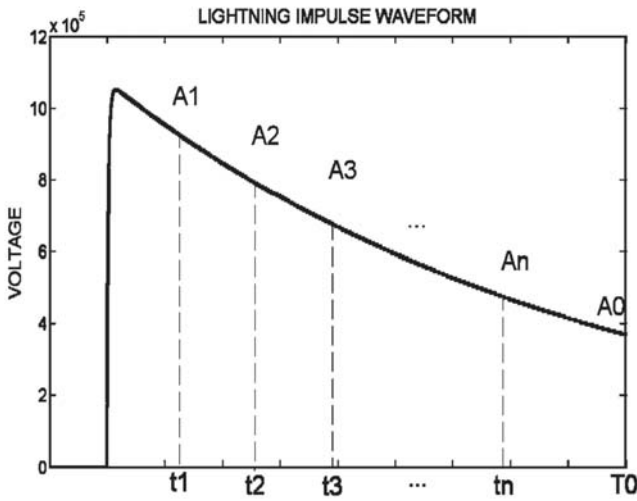
จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ซึ่งมีรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ คือ

$$M(t) = A(e^{\alpha(t-t_0)} - e^{\beta(t-t_0)}) \quad (15)$$

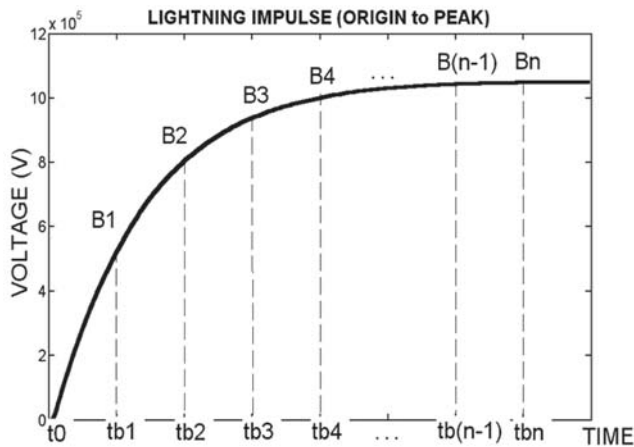
พิจารณาเฉพาะส่วนหลังคลื่น จะพบว่า ค่าของ $(-Ae^{\beta(t-t_0)}) \rightarrow 0$ นั่นคือ สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม จะกลายเป็น

$$M(t) = Ae^{\alpha(t-t_0)} \quad (16)$$

เลือกจุดของส่วนหลังคลื่น n จุด ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงการเลือกจุดจากหลังคลื่น n จุด



ภาพที่ 7 แสดงการเลือกจุดหน้าคลื่น n จุด

จากภาพที่ 6 พิจารณาเฉพาะช่วง จากจุด A_1 ถึง A_0 สามารถแทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์

$$M(t) = A_1 e^{\alpha_1(t-t_1)} \quad (17)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{(T_0 - t_n)} \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \quad (18)$$

จะได้
$$\alpha_{\text{initial}} = -\frac{1}{(n)} \sum_{i=1}^n \text{abs}(\alpha_i) \quad (19)$$

และ
$$A_{\text{initial}} = A_0 e^{\alpha_{\text{initial}}(t_0 - T_0)} \quad (20)$$

พิจารณาส່วนหน้าคลื่นจากจุด t_0 ถึงจุดสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เลือกจุดหน้าคลื่นมาทั้งสิ้น n จุด ดังภาพที่ 7

จากสมการที่ 15 แทนค่าจากจุด B_1 จะได้

$$B_1 = A_{\text{initial}} \left(e^{\alpha_{\text{initial}}(t_{B1}-t_0)} - e^{\beta_1(t_{B1}-t_0)} \right) \quad (21)$$

$$\beta_n = \frac{1}{(t_{Bn} - t_0)} \ln\left(e^{\alpha_{\text{initial}}(t_{Bn}-t_0)} - \frac{B_n}{A_{\text{initial}}} \right) \quad (22)$$

จะได้
$$\beta_{\text{initial}} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{abs}(\beta_i) \quad (23)$$

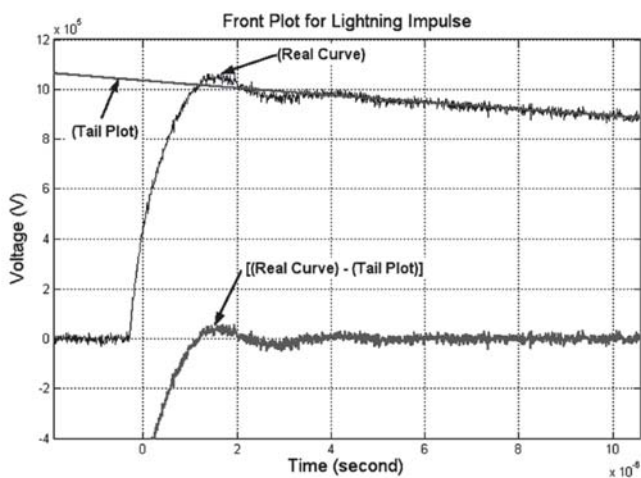
3. การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ย

3.1 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

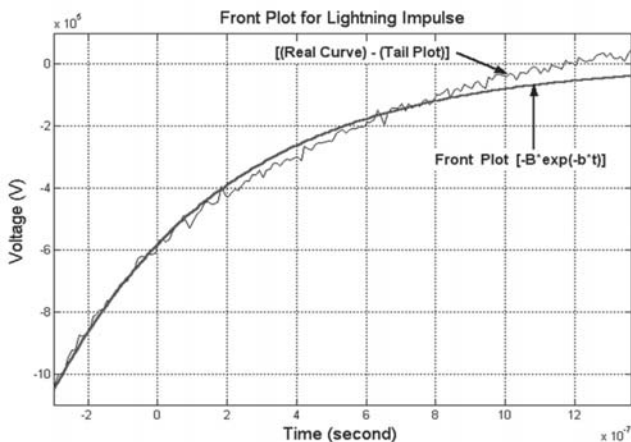
สมการรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในทางทฤษฎี ได้แก่ สมการเอกซิปโนเนนเชียลคู่ สามารถดัดแปลงเพิ่มความยืดหยุ่นในการคำนวณ รูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม ได้เป็น

$$M(t) = Ae^{\alpha(t-t_{01})} - Be^{\beta(t-t_{02})} \quad (24)$$

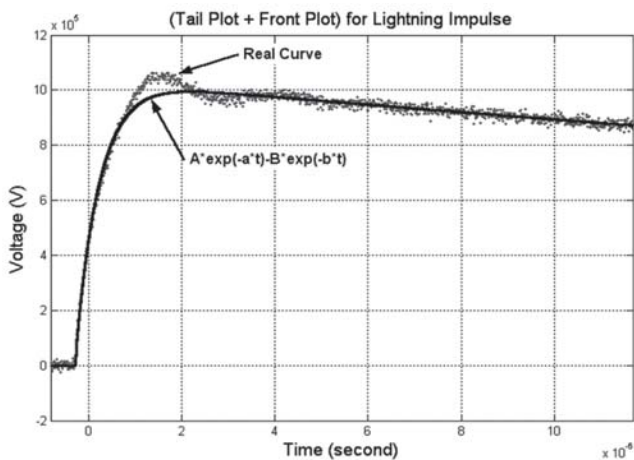
สมการที่ 24 เป็นสมการที่ใช้การประดิษฐ์รูปคลื่นเฉลี่ยโดยวิธีตัวกรองคาถาและวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ โดยจะใช้การประดิษฐ์ฟังก์ชัน 2 ครั้ง คือประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่นก่อน ดังภาพที่ 8 แล้วจึงทำการประดิษฐ์ส่วนหน้าคลื่น ดังภาพที่ 9 จากนั้นนำรูปคลื่นทั้งสองส่วนมารวมกัน ได้เป็นรูปคลื่นเฉลี่ยของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็มตามสมการแบบจำลอง สมการที่ 24 ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 8 แสดงการประดิษฐ์ส่วนหลังคลื่น (TDG 8)



ภาพที่ 9 แสดงการประดิษฐ์ส่วนหน้าคลื่น (TDG 8)



ภาพที่ 10 ผลรวมของการประดิษฐ์รูปคลื่น (TDG 8)

3.2 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ

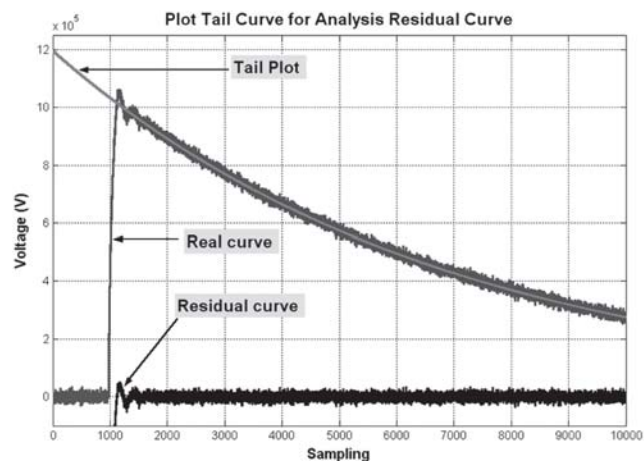
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับ โปรแกรม TDG มีเฉพาะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับที่หน้าคลื่นเท่านั้น รูปคลื่นดังกล่าวจะไม่มีข้อมูลส่วนหลังคลื่นเลย ดังนั้นในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์จากรูปคลื่นเฉลี่ยจากสมการที่ 24 เลือกค่า $\alpha = -1/(68.5 \mu s)$ คงที่ ค่าเริ่มต้นของค่าคงที่อื่นใช้วิธีการหาค่าเริ่มต้นตามข้อ 2 โดยสมมติรูปคลื่นสับตอนที่แรงดันประมาณ 70-90% ของแรงดันสูงสุด และใช้จุดเริ่มต้นการประดิษฐ์รูปคลื่นจากเวลาเริ่มต้น จนถึงจุดสูงสุดของข้อมูล

3.3 การคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ยของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงจากรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรม TDG มีเพียง 2 กรณี ได้แก่รูปคลื่นอ้างอิงในกรณี 5 และ 10 ซึ่งมีสัญญาณรบกวน ใช้วิธีการหาค่าเริ่มต้นตามวิธีการในข้อ 2 และใช้สมการที่ 24 ในการคำนวณรูปคลื่นเฉลี่ย

3.4 การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง

1. การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง ซึ่งเป็นผลต่างของรูปคลื่นจริง และรูปคลื่นที่ประดิษฐ์ขึ้น ดังภาพที่ 11 เพื่อหาความถี่ของการแกว่ง จะใช้รูปคลื่นตกค้างจำนวน 512 จุด ดังภาพที่ 12 นำไปคำนวณโดยใช้ FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อหาขนาดความถี่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด จะถือเป็นความถี่ของการแกว่ง ดังภาพที่ 13 ในกรณีนี้ ได้ความถี่ของการแกว่งประมาณ 390 kHz



ภาพที่ 11 การวิเคราะห์รูปคลื่นตกค้าง (TDG 8)

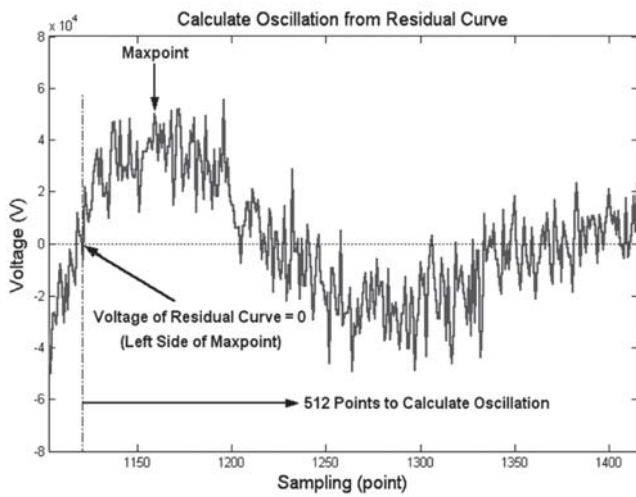
2. การวิเคราะห์เวลาที่เกิดส่วนพุ่งเกินหาค่าได้

ดังภาพที่ 14

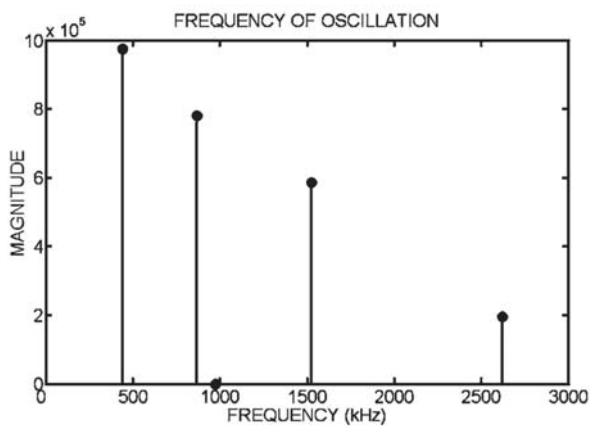
ผลการศึกษา

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม TDG

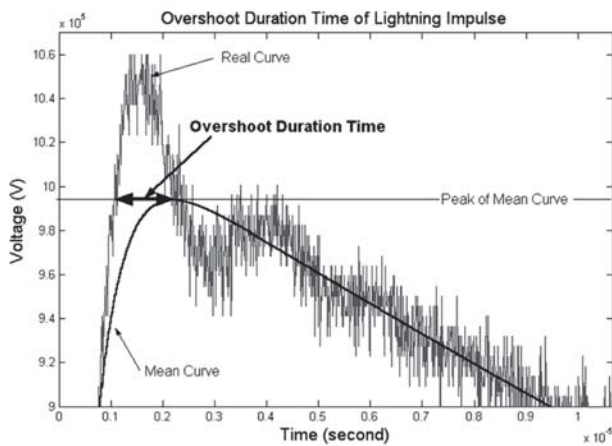
TDG	ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรมมาตรฐาน TDG		
	ค่ายอด (MV)	T1 (us)	T2 (us)
1	1.04 - 1.06	0.81 - 0.87	57.5 - 62.5
2	0.86 - 0.88	0.49 - 0.53	0.55 - 0.59
3	1.04 - 1.06	1.6 - 1.7	45 - 49
4	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52
5	0.94 - 0.96	240 - 260	2400 - 2600
6	1.04 - 1.06	0.81 - 0.87	57.5 - 62.5
7	0.86 - 0.88	0.49 - 0.53	0.55 - 0.59
8	1.04 - 1.06	1.6 - 1.7	45 - 49
9	0.96 - 0.99	1.0 - 1.1	48 - 52
10	0.94 - 0.96	240 - 260	2400 - 2600
11	0.94 - 0.96	1.07 - 1.19	82 - 91
12	0.84 - 0.87	0.48 - 0.54	0.51 - 0.56
13	-1.08 - -1.06	3.40 - 3.76	56 - 62
14	-0.97 - -0.95	1.85 - 2.05	43 - 47



ภาพที่ 12 การเลือกจุดจากรูปคลื่นตกค้าง 512 จุด



ภาพที่ 13 ความถี่การแกว่ง (ขนาดใหญ่ที่สุด) (TDG 8)



ภาพที่ 14 แสดงเวลาการเกิดส่วนพุ่งเกิน (TDG 8)

จากตารางที่ 1 และ 2 พบว่าผลของการประเมินค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยวิธีตัวกรองคาลมาน และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกกรณี

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าเฉลี่ย ME และค่าเฉลี่ย RMSE ของวิธีตัวกรองคาลมาน มีค่าต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

ตารางที่ 2 ผลการประเมินจากวิธีการที่ใช้

TDG	วิธีตัวกรองคาลมาน			วิธีเลขเวเนเบิร์ก-มาร์ควอดท์		
	ค่ายอด (MV)	T1 (us)	T2 (us)	ค่ายอด (MV)	T1 (us)	T2 (us)
1	1.05	0.84	60.2	1.05	0.84	60.2
2	0.87	0.51	0.58	0.87	0.51	0.58
3	1.05	1.66	47.5	1.05	1.67	46.8
4	0.98	1.05	49.7	0.98	1.05	49.6
5	0.95	251	2498	0.95	250	2508
6	1.05	0.84	60.2	1.05	0.84	59.4
7	0.87	0.51	0.58	0.87	0.51	0.58
8	1.05	1.66	46.8	1.05	1.68	46.7
9	0.98	1.05	49.7	0.98	1.05	49.6
10	0.95	249	2504	0.95	249	2505
11	0.96	1.15	86.6	0.96	1.15	86.6
12	0.85	0.51	0.54	0.85	0.52	0.53
13	-1.07	3.61	58.8	-1.07	3.5	58.7
14	-0.97	1.89	45.2	-0.97	1.89	45.1

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่า ME และ RMSE

TDG	วิธีตัวกรองคาลมาน		วิธีเลขเวเนเบิร์ก-มาร์ควอดท์	
	ME (V)	RMSE (V)	ME (V)	RMSE (V)
1	4.44	6.28	149.80	7.22
2	0.09	28.26	59.01	54.78
4	463.19	94.87	512.96	94.92
5	228.16	7.46	321.80	11.34
6	126.28	88.16	311.51	88.38
7	406.10	245.44	507.54	257.30
9	505.74	129.54	800.19	129.64
10	189.53	79.86	262.47	79.86
12	306.61	190.63	551.16	207.54
14	673.27	96.49	532.56	95.64
เฉลี่ย	290.34	96.70	400.90	102.66

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประเมิน

TDG	เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ย (วินาที)	
	วิธีตัวกรองคาลมาน	วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์
1	8	9
2	2	1
3	6	9
4	8	6
5	12	11
6	8	9
7	2	1
8	6	10
9	8	8
10	12	14
11	16	12
12	5	1
13	6	11
14	8	6
เฉลี่ย	8.2	6.6

จากตารางที่ 4 พบว่าวิธีตัวกรองคาลมานใช้เวลาในการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยเฉลี่ยสูงกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

สรุปผลการศึกษา

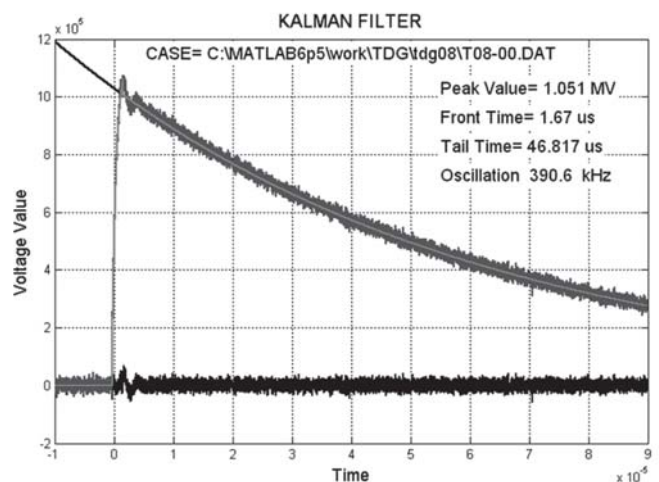
แนวทางการประเมินค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้วิธีการและสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ ที่ผ่านมา มีการกำหนดค่าเริ่มต้นจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ($A = 1.03 \cdot U_{\text{peak}}$, $\alpha = -1/(68.5 \mu\text{s})$, $\beta = -1/(0.405 \mu\text{s})$) เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณซึ่งค่าเริ่มต้นดังกล่าวนี้ เมื่อนำมาทดสอบกับรูปคลื่น TDG พบว่าค่าเริ่มต้นที่กำหนดไม่เหมาะสม เนื่องจากรูปคลื่นอ้างอิงจากโปรแกรมมาตรฐาน TDG มีความหลากหลายของค่ายอดเวลาหน้าคลื่น และเวลาหลังคลื่น

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการหาค่าเริ่มต้นแบบใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทั้งรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสับและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง โดยใช้อัลกอริทึมของวิธีตัวกรองคาลมาน และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ พบว่าได้ผลดีมาก เนื่องจากผลทดสอบกับรูปคลื่น TDG ที่เป็นแรงดันอิมพัลส์ 14 กรณี ได้ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ตรงตามเกณฑ์มาตรฐานทุกกรณี ทุกรูปคลื่น

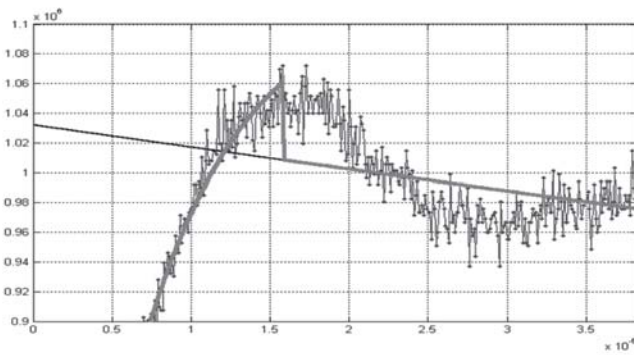
เปรียบเทียบวิธีตัวกรองคาลมาน กับวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ พบว่าผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ทั้งสองวิธีการมีความถูกต้อง เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน IEC 1083-2 (โปรแกรม TDG) โดยวิธีตัวกรองคาลมานมีค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (ME) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นตกค้าง (RMSE) ต่ำกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ แต่วิธีตัวกรองคาลมานใช้เวลาในการประเมินรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์โดยเฉลี่ยนานกว่าวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์

ภาคผนวก

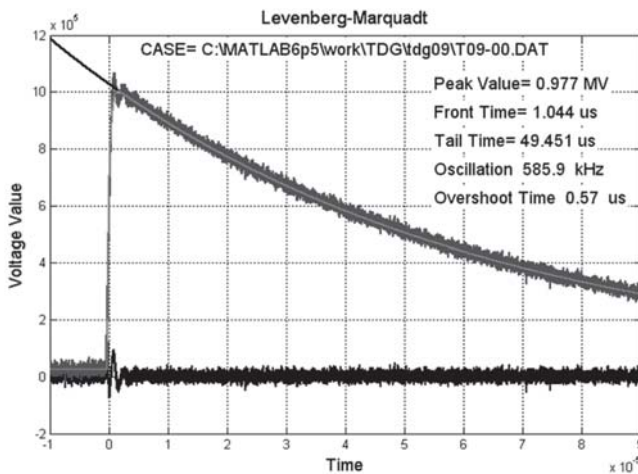
แสดงรูปคลื่นที่ได้บางส่วนจากผลการทดสอบโปรแกรมประเมินค่าพารามิเตอร์ โดยแสดงวิธีตัวกรองคาลมานทดสอบกับรูปคลื่น TDG กรณีที่ 8 (คำนวณจากรูปคลื่นจริง) และวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ทดสอบกับรูปคลื่น TDG กรณีที่ 9 (คำนวณจากรูปคลื่นเฉลี่ย)



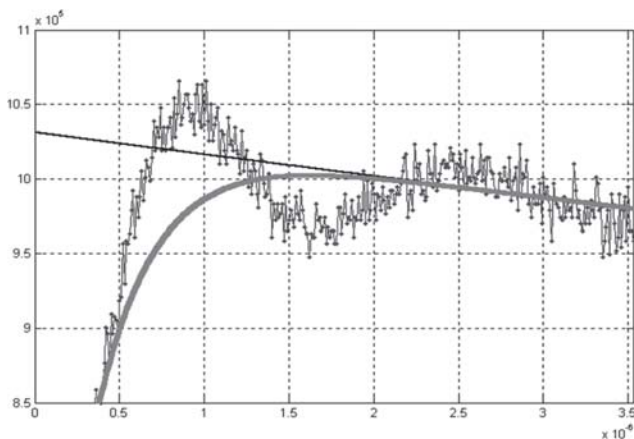
ภาพที่ 15 วิธีตัวกรองคาลมานทดสอบกับ TDG 8



ภาพที่ 16 ค่ายอดวิธีตัวกรองคาลมานกับ TDG 8



ภาพที่ 17 วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับ TDG 9



ภาพที่ 18 ค่ายอดวิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์กับ TDG 9

เอกสารอ้างอิง

- Boaventura, W. C. 2003. "Modelling impulse voltage test waveforms using time-domain fitting based on Prony's method." *International Symposium on High Voltage Engineering*. 253 - 258.
- Brede, A. P., Werle, P., Gockenbach, E. and Borsi, H. 1999. "A New Method of Determining the Mean Curve of Lightning Impulses According to IEC 60060-1." *International Symposium on High Voltage Engineering*. 467: 74-77.
- De Boor, C. 1978. *A Practical Guide to Splines*. Springer-Verlag.
- IEC 60060-1. 1989. "General definitions and test requirements." *High-voltage test techniques - Part 1*.
- IEC 60060-2. 1996. "Measuring system." *High-voltage test techniques - Part 2*.
- IEC 61083-2. 1996. "Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveform." *Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part2*.
- Perez, J., Martinez, J. 1995. "Kalman Filter Algorithm for Digitally Recorded Lightning Impulse Parameter Evaluation." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1713-1719.
- Perez, J., Martinez, J. 1996. "Digitally Recorded Lightning Impulse with Overshoot Parameter Evaluation by Using Kalman Filtering Method." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 11, 4: 1005-1014.
- Wong, K. C. P., et al. 1999. "Digital Measurement of Lightning Impulse Parameters Using Curving Fitting Algorithm." *International Symposium on High Voltage Engineering*. 467: 193-196.



>> นพดล โคตรพันธ์

จบการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา