# บทที่ 5
# การตรวจสอบสภาพของเซอร์กิตเบรกเกอร์

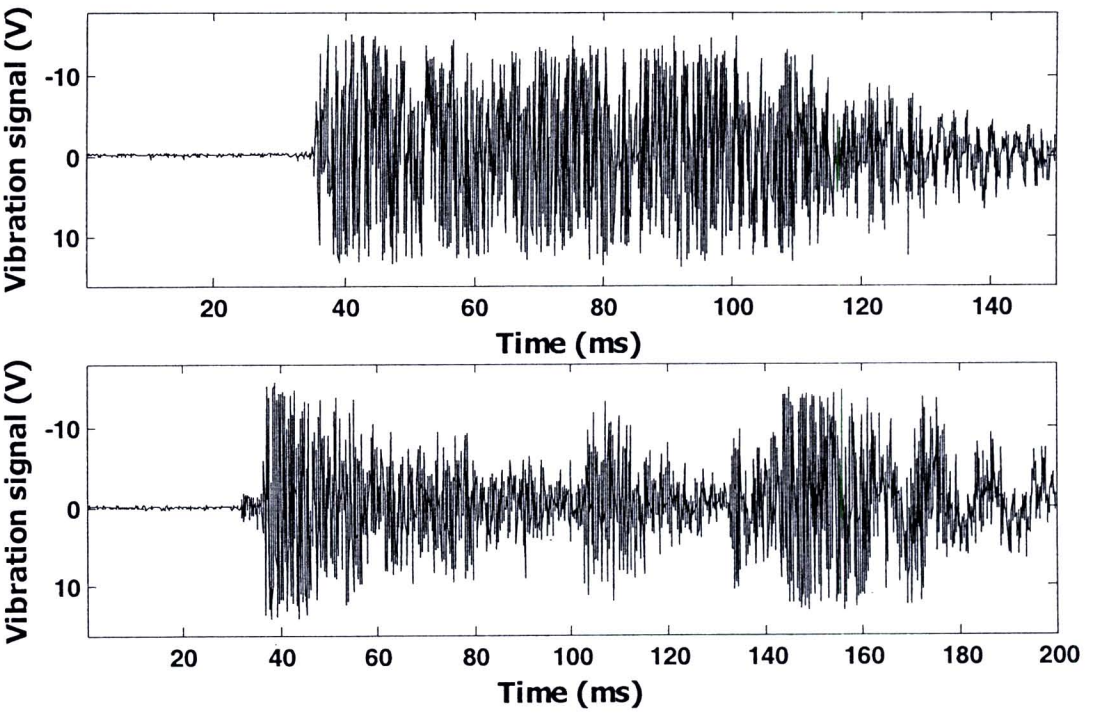
ในงานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์หลักอยู่สองประการ ประการที่หนึ่งคือออกแบบอัลกอริธึมของรีเลย์ผลต่างให้มีความคงทนต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส ซึ่งวัตถุประสงค์นี้ได้สำเร็จลุล่วงดังที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า ส่วนวัตถุประสงค์หลักประการที่สองคือการค้นหาวิธีการที่จะช่วยให้ง่ายในการวิเคราะห์และตรวจจับความผิดปกติในการเปิดหรือปิดวงจรจากการสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ว่าการตรวจสภาพของเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นสิ่งที่จำเป็นในการตรวจสภาพนั้นมีวิธีการอยู่หลายรูปแบบ เช่น การใช้สัญญาณพลวัตของความต้านทานหน้าสัมผัส (Dynamic Contact Resistance) การวิเคราะห์จากความเร็วและลักษณะการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัส (Travelling Curve Analysis) การวิเคราะห์สัญญาณเสียง [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42] การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถตรวจสอบอุปกรณ์ภายในได้หลายชิ้นส่วน อีกทั้งช่วยประหยัดทั้งเวลาและแรงงาน เพราะในการตรวจวัดไม่จำเป็นต้องถอดชิ้นส่วนของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อที่จะตรวจสภาพอุปกรณ์ภายใน แต่ผู้ที่จะแปลความหมายของสัญญาณการสั่นสะเทือนนั้นจะต้องมีความชำนาญพิเศษในการแปลข้อมูล ผู้วิจัยจึงได้ค้นหาวิธีทางเลือกที่จะช่วยให้สามารถแปลความหมายของสัญญาณการสั่นสะเทือน และสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ง่ายขึ้น โดยผู้วิจัยได้นำสัญญาณการสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในสภาพต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ เช่น กรณีของแรงดันแบตเตอรี่ของสถานีไฟฟ้าย่อยอยู่ในระดับสูงหรือต่ำผิดปกติ แรงดันน้ำมันไฮดรอลิคที่สูงหรือต่ำผิดปกติ บุชที่ชำรุด ว่าจะมีผลต่อแรงสั่นสะเทือนอย่างไรบ้าง สัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งหมดจะถูกนำไปผ่านการแปลงเวฟเลทซึ่งจะช่วยให้การตรวจจับความผิดปกตินั้นทำได้ง่ายขึ้น

## 5.1 การแปลงเวฟเลท

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้จากการตรวจวัดนั้นเป็นสัญญาณอนุกรมเวลา (Time Series) ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 5-1 การจะแปลความหมายจากสัญญาณดังกล่าวโดยใช้สายตามนุษย์ทำได้ไม่ง่ายนัก การแปลงสัญญาณดังกล่าวจากที่เคยอยู่ในปริภูมิเวลา (Time Domain) ให้เป็นสัญญาณในปริภูมิเวฟเลท (Wavelet Domain) จะทำให้การแปลข้อมูลหรือการตรวจจับสิ่งผิดปกติทำได้ง่ายขึ้น

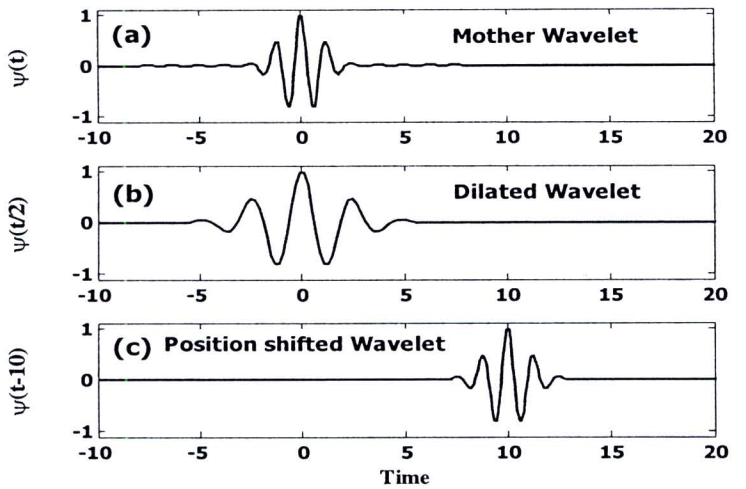
หลักการของการแปลงเวฟเลทนั้นมีหลักการที่คล้ายกับการแปลงฟูริเยร์ช่วงเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform, STFT) การแปลงฟูริเยร์ช่วงเวลาสั้นนั้นจะทำการแยกสัญญาณต้นฉบับออกเป็นสัญญาณไซนูซอยด์หลายสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ โดยค่าขนาดสัญญาณแต่ละความถี่นั้นจะได้จากผลของการทำสหสัมพันธ์(Correlation) ระหว่างสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณไซนูซอยด์เชิงซ้อนที่ความถี่นั้น ๆ เวฟเลทก็ใช้หลักการที่คล้ายกัน จะต่างกันก็เพียงแต่การแปลงเวฟเลทจะใช้สัญญาณเวฟเลทไปทำสหสัมพันธ์ไขว้กับสัญญาณต้นฉบับแทนที่จะเป็นสัญญาณไซนูซอยด์เชิงซ้อน โดยที่สัญญาณเวฟเลทดังกล่าวสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงความถี่ได้ด้วยการย่นหรือยืดสัญญาณ (Dilation) และเปลี่ยนคุณสมบัติทางเวลาได้ด้วยการเลื่อน (Shifting) โดยการแปลงเวฟเลทสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (5-1)




**ภาพที่ 5-1** สัญญาณสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะเปิด (บน) และปิด (ล่าง) หน้าสัมผัส

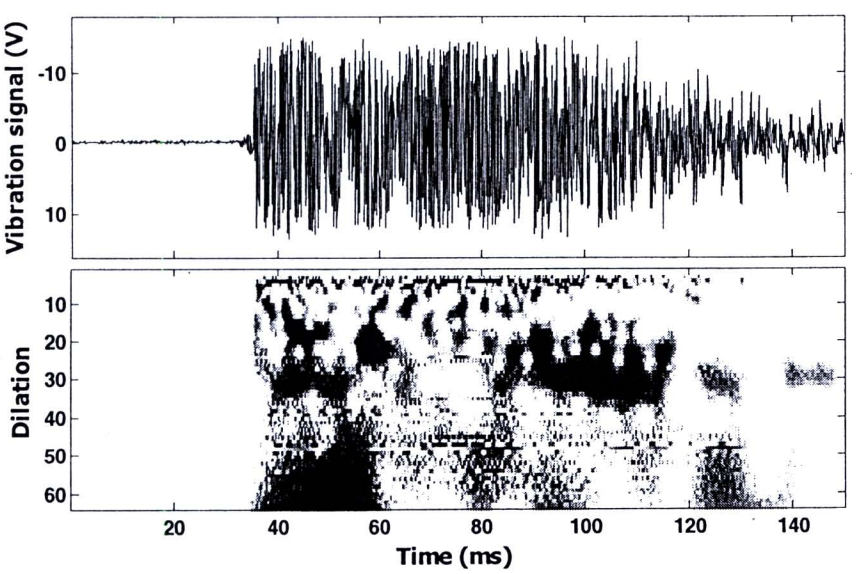
$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a})\,dt \qquad (5\text{-}1)$$

โดยที่ C(a,b) คือค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลทที่ Dilation และ Shifting มีค่าเป็น a และ b ตามลำดับ สำหรับ f(t) คือฟังก์ชันของสัญญาณต้นฉบับ และ $\Psi$ คือฟังก์ชันของเวฟเลทแม่ (Mother Wavelet) ภาพที่ 5-2 แสดงตัวอย่างของเวฟเลทแม่ เวฟเลทที่ถูกยืด และเวฟเลทที่ถูกเลื่อน ในกรณีที่เวฟเลทถูกยืดให้มีขนาดกว้าง (ค่า a สูง) จะบ่งชี้ถึงสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากเวฟเลทถูกย่นความกว้าง(ค่า a ต่ำ) จะบ่งชี้ถึงสัญญาณที่มีความถี่สูง




**ภาพที่ 5-2** สัญญาณเวฟเลท

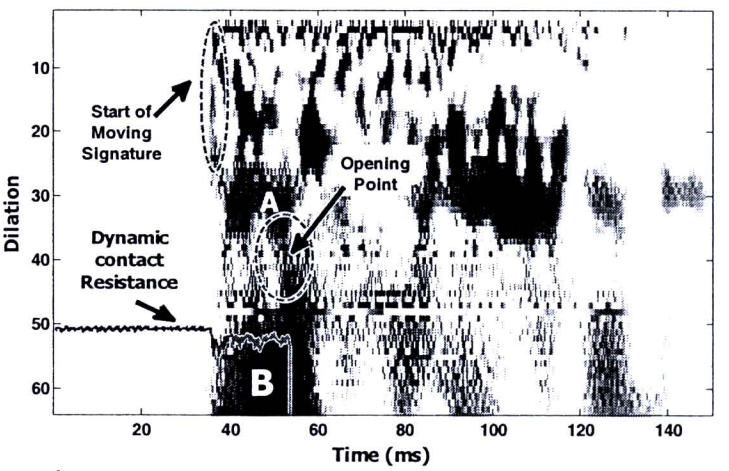
ข้อได้เปรียบของการแปลงเวฟเลทคือสามารถที่จะแยกองค์ประกอบที่ความถี่ใด ๆ ก็ได้ในทุกช่วงความถี่ ทุกช่วงเวลาที่ต้องการ ดังนั้นการแปลงเวฟเลทจึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับสัญญาณประเภทที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และไม่เป็นสัญญาณคาบ เมื่อนำสัญญาณการสั่นสะเทือนในภาพที่ 5-1 มาทำการแปลงเวฟเลท โดยใช้เวฟเลทแม่ชนิด มอร์เลทเชิงซ้อน (Complex Morlet) มี Bandwidth Parameter เป็น 1 และ Wavelet Center Frequency มีค่าเป็น 1.5 ผลของการแปลงเวฟเลทจะเป็นดังแสดงในภาพที่ 5-3 ซึ่งจะเห็นว่าผลของการแปลงเวฟเลทจะมีลักษณะเป็นกลุ่มสีเข้มหลายๆจุด จุดที่มีสีเข้มมากบ่งชี้ว่าจุดนั้นมีค่าของขนาดสัญญาณที่สูง ตัวอย่างเช่น ในภาพที่ 5-3 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณความถี่ต่ำ (Dilation a = 60) มีขนาดสูงที่เวลา 40-60 มิลลิวินาที




**ภาพที่ 5-3** สัญญาณการสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจร (บน) และผลของการแปลงเวฟเลท (ล่าง)

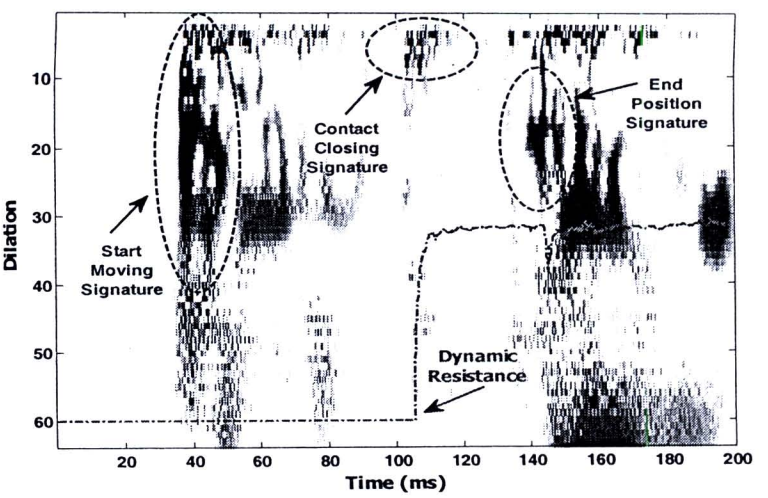
## 5.2 วิธีการแปลข้อมูลจากสัญญาณเวฟเลท

การแสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนปริภูมิเวฟเลทนั้นทำให้การแปลข้อมูลทำได้ง่ายขึ้น เพราะสัญลักษณ์ของการสั่นสะเทือนในจังหวะต่าง ๆ นั้นมีเอกลักษณ์ที่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 5-4 แถบสีดำแนวตั้งที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 37 มิลลิวินาทีนั้นเป็นสัญลักษณ์บ่งชี้ว่าหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มมีการเคลื่อนไหว และหน้าสัมผัสจะมีการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ในจุดที่เป็นยอดสูงของพื้นที่สีเข้ม B และเป็นจุดเชื่อมต่อกับพื้นที่สีเข้ม A สัญลักษณ์ของการแยกกันของหน้าสัมผัสได้รับการยืนยันว่าเป็นจริงเมื่อนำสัญญาณความต้านทานของหน้าสัมผัส (Dynamic Contact Resistance) มาเปรียบเทียบ




**ภาพที่ 5-4** สัญญาณการสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจรในปริภูมิเวฟเลท

เช่นเดียวกันกับสัญญาณการสั่นสะเทือนขณะปิดวงจร ภาพของการแปลงเวฟเลทดังแสดงในภาพที่ 5-5 สามารถบอกได้ว่า หน้าสัมผัสเริ่มมีการเคลื่อนที่ที่เวลาใด หน้าสัมผัสมีการสัมผัสกันเมื่อใด และหน้าสัมผัสเคลื่อนที่ (Moving Contact) ชนจุดสิ้นสุดที่เวลาใด




**ภาพที่ 5-5** สัญญาณการสั่นสะเทือนขณะปิดวงจรในปริภูมิเวฟเลท

**5.3 การแปลงสัญญาณเวฟเลทของสัญญาณสั่นสะเทือนในกรณีต่าง ๆ**

ในการหาเอกลักษณ์ที่ใช้ในการบ่งชี้ข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด Puffer Type ขณะไม่มีการจ่ายภาระในกรณีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5-1 ซึ่งประกอบไปด้วยการแปรผันของแรงดันแบตเตอรี่ การแปรผันของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิค และการตรวจสอบความแตกต่างระหว่างแรงสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ใหม่เทียบกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และสัญญาณการสั่นสะเทือนในกรณีที่มีชิ้นส่วนทางกลเกิดการชำรุด

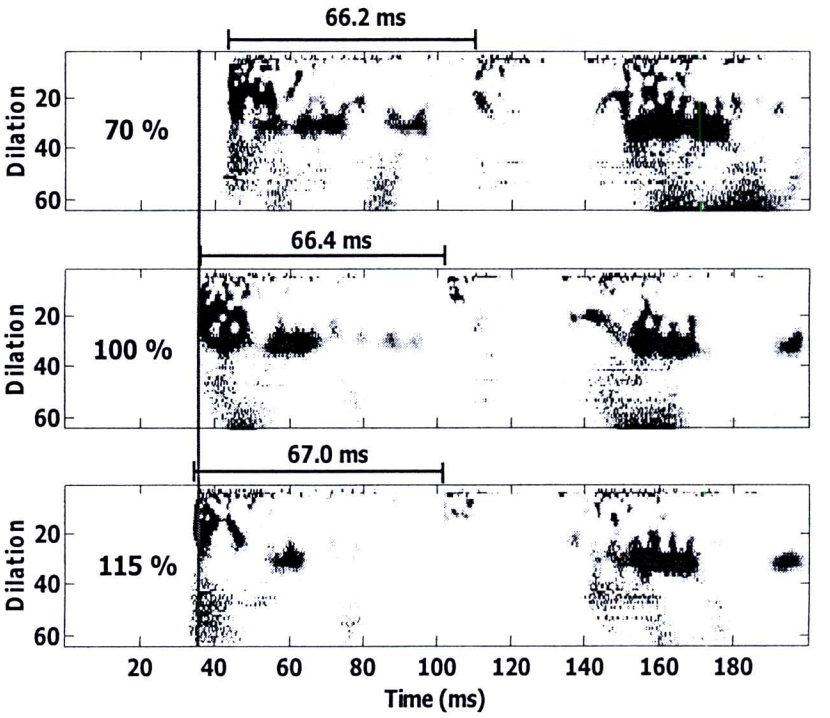
**ตารางที่ 5-1** สภาวะต่าง ๆ ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์

| สภาวะขณะทำการทดสอบ | Voltage % | Hydraulic Pressure (Bar) | จำนวนสัญญาณทดสอบ |
|---|---|---|---|
| สภาวะปกติ | 100% | 320 | 15 |
| Variable supply voltage | 115% | 320 | 15 |
| | 70% | 320 | 15 |
| Variable oil pressure | 100% | 280 | 15 |
| | 100% | 250 | 15 |
| ชิ้นส่วนทางกลชำรุด | 100% | 320 | 45 |

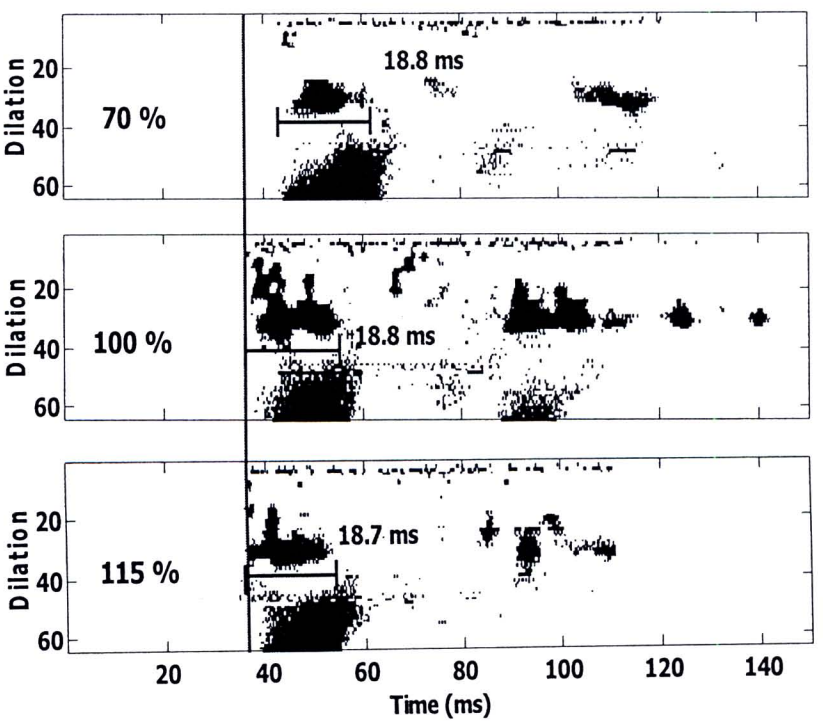
5.3.1 ผลกระทบของแรงดันของแหล่งจ่ายระบบควบคุมที่มีผลต่อแรงสั่นสะเทือน

เมื่อมีการสั่งการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดหรือปิดวงจร ระบบจะส่งสัญญาณไปยังขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid Coil) ให้เคลื่อนที่ไปปลดสลักเพื่อให้กลไกการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสนั้นเริ่มเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของขดลวดโซลินอยด์นั้นอาศัยพลังงานจากชุดแหล่งจ่ายระบบควบคุม (แหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่ ในสถานีไฟฟ้า) ดังนั้นหากแหล่งจ่ายระบบควบคุมมีแรงดันที่สูง จะส่งผลให้โซลินอยด์เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ทำให้หน้าสัมผัสเริ่มเคลื่อนที่ได้เร็ว ในทางกลับกันหากแรงดันของแหล่งจ่ายระบบควบคุมอยู่ในระดับต่ำก็จะส่งผลให้โซลินอยด์เคลื่อนที่ช้าและทำให้การเริ่มเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสช้ากว่าปกติ จากการทดลองนำสัญญาณแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากกรณีที่ค่าแรงดันระบบควบคุมอยู่ในระดับ 70% 100% และ 115% มาเปรียบเทียบกันนั้น พบว่าการแจ้งเตือนความผิดปกติของแรงดันระบบควบคุมโดยสัญญาณแรงสั่นสะเทือนนั้นสามารถทำได้ ดังแสดงในภาพที่ 5-6 และ ภาพที่ 5-7 เห็นได้ว่า จุดเอกลักษณ์ซึ่งเป็นกลุ่มก้อนสีเข้มในแต่ละกรณีนั้น

มีความยาวและมีลักษณะรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน จะต่างกันแต่เพียงจุดเอกลักษณ์ในกรณีที่แรงดันระบบควบคุมต่ำ จะเกิดขึ้นช้ากว่ากรณีที่มีแรงดันระบบควบคุมสูง



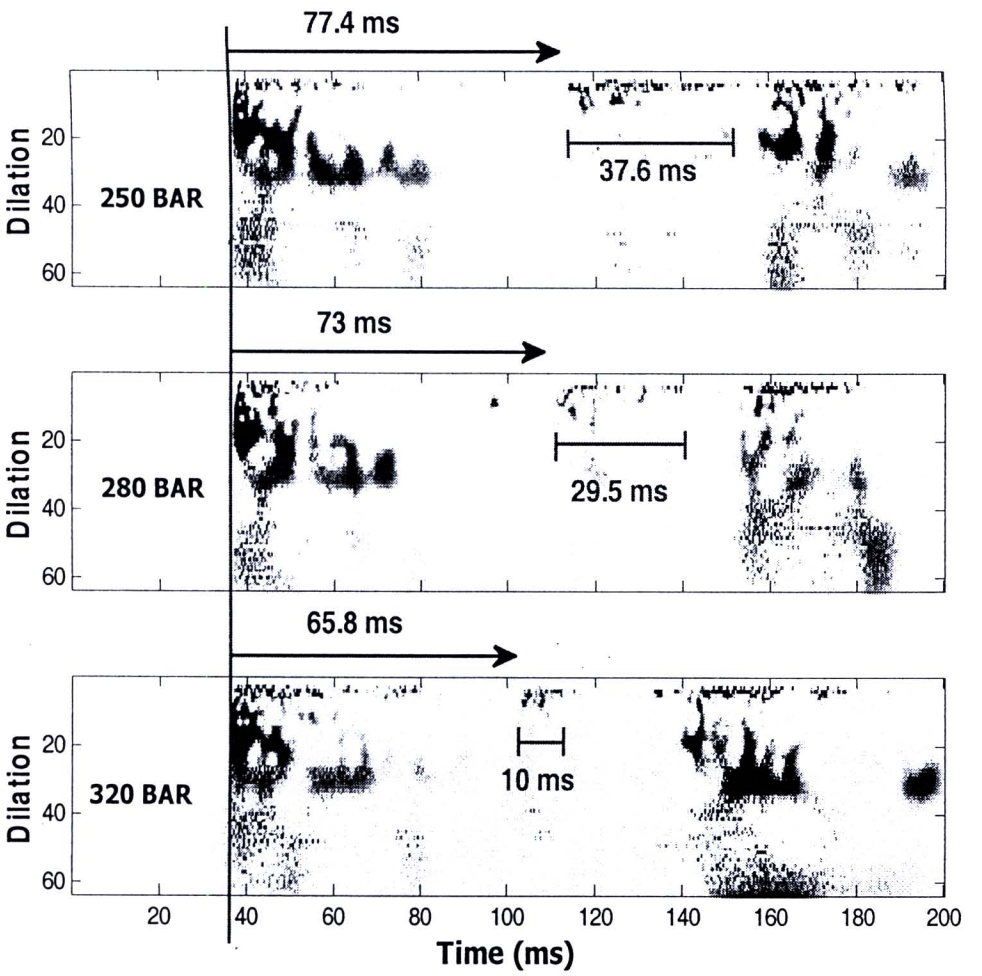

**ภาพที่ 5-6** สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะปิดวงจรในกรณีที่มีแรงดันระบบควบคุมแตกต่างกัน



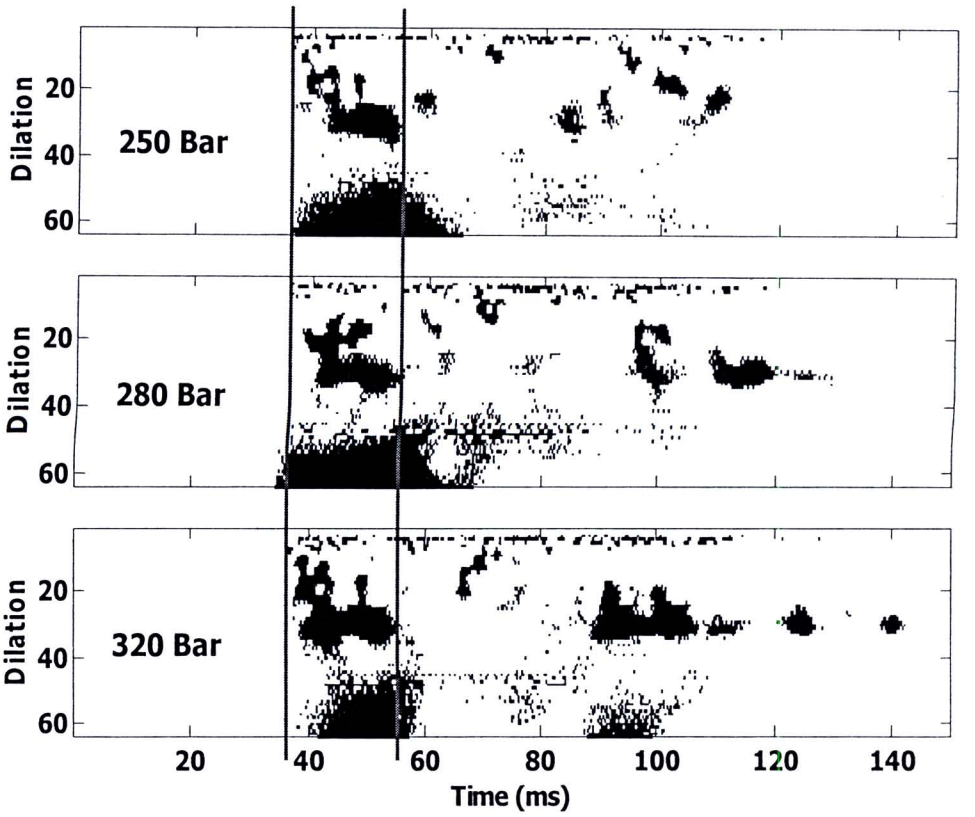

**ภาพที่ 5-7** สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจรในกรณีที่มีแรงดันระบบควบคุมแตกต่างกัน

5.3.2 ผลกระทบของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิคที่มีผลต่อแรงสั่นสะเทือน

หลังจากที่โซลินอยด์ได้ผลักสลักเพื่อให้หน้าสัมผัสเริ่มเคลื่อนที่ แรงดันจากระบบไฮดรอลิคจะผลักหน้าสัมผัสให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แรงดันของระบบน้ำมันไฮดรอลิคจึงมีผลโดยตรงต่อความเร็วของการเคลื่อนที่ จากการทดลองนำสัญญาณแรงสั่นสะเทือนที่ได้จากกรณีที่ระดับแรงดันไฮดรอลิคอยู่ที่ 250 280 และ 320 Bar พบว่าการแจ้งเตือนความผิดปกติของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิคโดยสัญญาณแรงสั่นสะเทือนนั้นสามารถทำได้ ดังแสดงในภาพที่ 5-8 ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนขณะทำการปิดวงจร จะเห็นได้ว่า ทุกระดับแรงดันจะมีการเริ่มต้นการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่หลังจากจุดเริ่มเคลื่อนที่ จุดเอกลักษณ์ต่าง ๆ จะเริ่มแตกต่างกัน หากแรงดันน้ำมันไฮดรอลิคมีค่าสูงขึ้น จุดเอกลักษณ์ต่าง ๆ นั้นจะมีขนาดที่เล็กลง และระยะทางระหว่างจุดเอกลักษณ์นั้นจะสั้นลงด้วย แต่สำหรับกรณีสัญญาณของแรงสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจร ในแต่ละระดับแรงดันมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ดังแสดงในภาพที่ 5-9



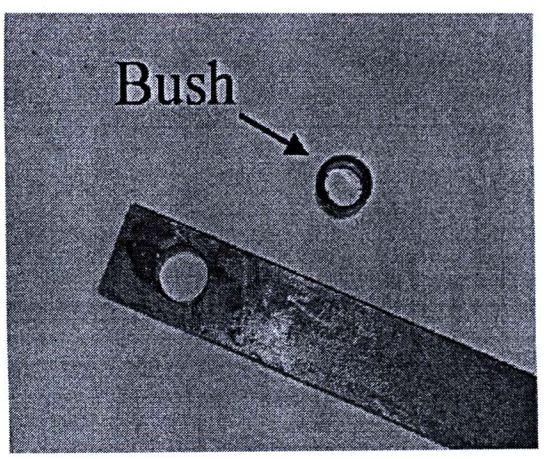

**ภาพที่ 5-8** สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะปิดวงจรในกรณีที่มีแรงดันระบบไฮดรอลิคแตกต่างกัน




**ภาพที่ 5-9** สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจรในกรณีที่มีแรงดันระบบไฮดรอลิคแตกต่างกัน

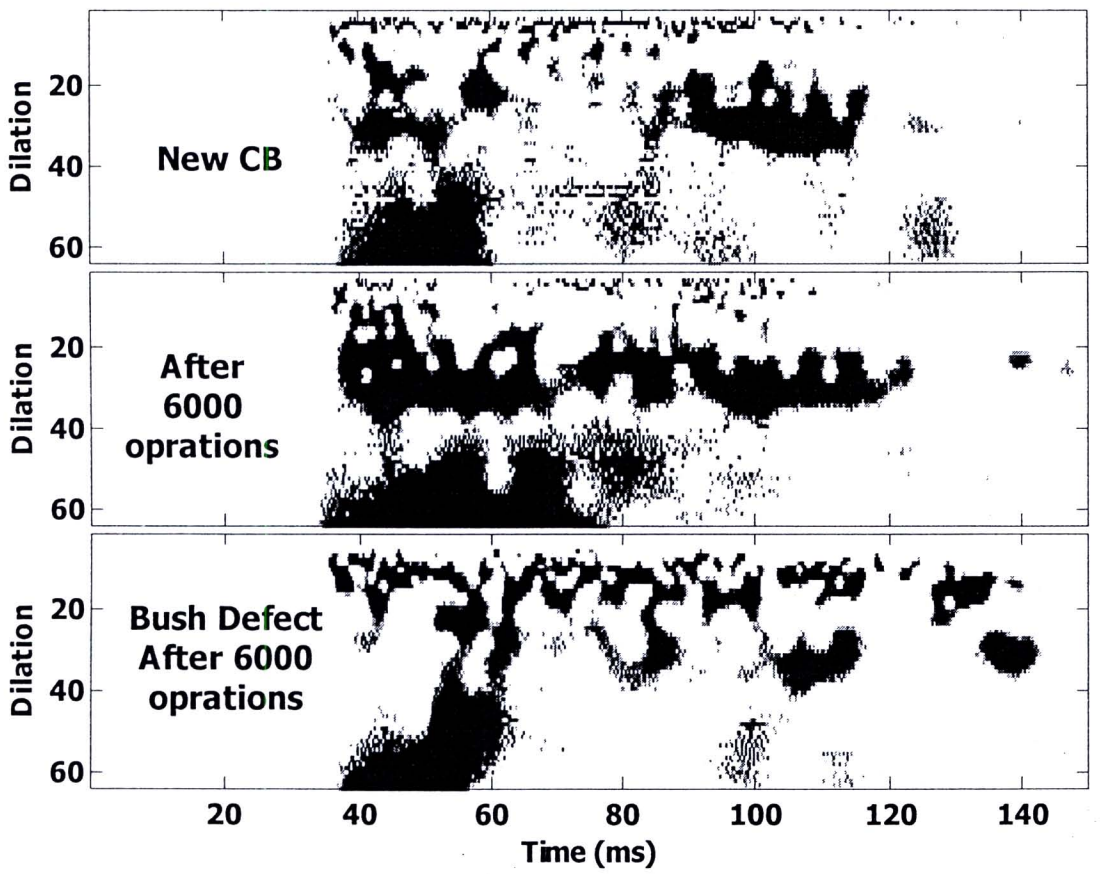
5.3.3 ผลกระทบของอายุการใช้งานและการชำรุดทางกลที่มีต่อสัญญาณแรงสั่นสะเทือน

ในการทดลอง ได้มีการสั่งเปิดและปิดวงจรเป็นจำนวน 6,000 ครั้งและหลังจากนั้นได้สร้างสถานการณ์จำลองว่าเกิดการเสียหายขึ้นกับชิ้นส่วนทางกลโดยการนำเอาบุช (Bush) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนทางกลชิ้นเล็กๆออก ดังแสดงในภาพที่ 5-10 และทำการเปิดและปิดวงจรของหน้าสัมผัส แล้วทำการแปลงแรงสั่นสะเทือนให้อยู่ในปริภูมิเวฟเลท




**ภาพที่ 5-10** บุชที่ถูกถอดออกเพื่อจำลองการชำรุดของชิ้นส่วนทางกล

ผลที่ออกมาพบว่าหลังจากที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ผ่านการใช้งานอย่างหนักถึง 6,000 ครั้ง ส่งผลให้มีการสั่นสะเทือนที่รุนแรงขึ้น โดยจะสังเกตได้จากในหลายจุดเอกลักษณ์มีสีที่เข้มขึ้น และยาวกว่าเดิมในแนวนอนดังแสดงในภาพที่ 5-11 แต่สำหรับกรณีที่มีการเสียหายของชิ้นส่วนทางกลแล้วจุดเอกลักษณ์ต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จะมีหลายจุดเอกลักษณ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นแนวตั้ง ซึ่งเส้นแนวตั้งนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ผิดปกติ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่หลายความถี่ในช่วงเวลาเดียวกัน หากตรวจพบว่าจุดเอกลักษณ์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชัดเจน เซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องได้รับการบำรุงรักษาในทันทีเพราะสิ่งเหล่านี้เป็นตัวบ่งชี้ว่าเกิดการเสียหายชำรุดของอุปกรณ์ภายในเซอร์กิตเบรกเกอร์




**ภาพที่ 5-11** การเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนในกรณีที่เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ใหม่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ผ่านการใช้งานมา 6,000 ครั้ง และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีการชำรุดของชิ้นส่วนทางกล