

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

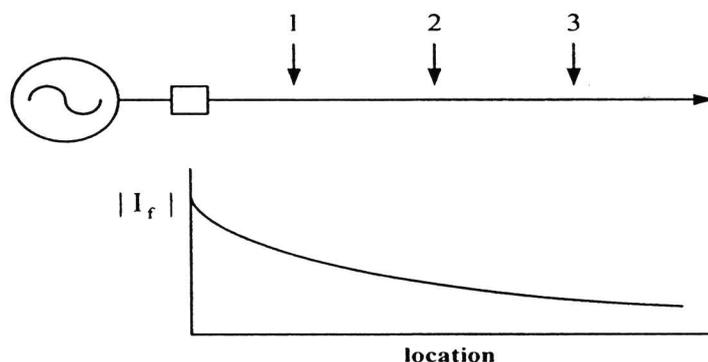
การมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยระบบการป้องกันและอุปกรณ์ที่มาตรฐานเป็นจำนวนมาก ระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลากหลายประเภทซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาอย่างเหมาะสมสำหรับการป้องกันสายส่งที่มีความซับซ้อน โดยที่รูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แต่ละลักษณะนั้น มีหลักการและวิธีการที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง

สายส่งเป็นอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ได้มากที่สุดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งมีระยะทางที่ยาวผ่านพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดฟอลต์ได้ เช่น ภูเขา, ป่าเขา รวมไปถึงชุมชนและแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ในการป้องกันที่ดี และระบบสายส่งส่วนใหญ่เป็นสายส่งที่มีลักษณะเป็นลูป (Loop Line) คือสายส่งที่สามารถรับไฟได้ทั้งสองด้าน ทำให้ฟอลต์มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การป้องกันแบบกระแสเกิน (Over Current Protection)

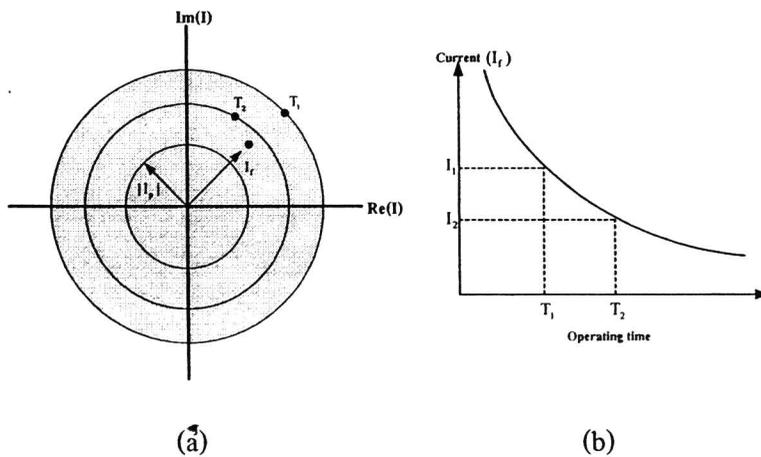
เป็นระบบการป้องกันพื้นฐาน โดยอาศัยหลักการทำงานคือการตรวจวัดกระแสฟอลต์ที่ 50 หรือ 60 เฮิร์ต ที่ปรากฏบนสายส่งในสถานะที่มีฟอลต์เกิดขึ้น ซึ่งกระแสฟอลต์นี้จะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทของฟอลต์ จำนวนเครื่องกำเนิดที่มีอยู่ในระบบ และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ เมื่อวัดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงขนาดของกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ซึ่งในระบบการป้องกันแบบกระแสเกินจะอาศัยการเปรียบเทียบขนาดของกระแสที่วัดได้ (I_f) จากหม้อแปลงกระแส (CT) กับค่ากระแสที่กำหนดเป็นเกณฑ์ (I_p) ซึ่งรีเลย์ที่ทำหน้าที่ในการวิเคราะห์ในรูปแบบนี้คือ รีเลย์กระแสเกิน (Over current relay) โดยมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้คือ ถ้ากระแสที่วัดได้มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ให้รีเลย์จะส่งปลดวงจร แต่ถ้ากระแสที่วัดได้มีค่าน้อยกว่ารีเลย์จะไม่ทำงานดังแสดงในสมการที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 (a)

$$\begin{aligned} |I_f| > |I_p| & \quad \text{trip} \\ |I_f| < |I_p| & \quad \text{block} \end{aligned} \quad (2.1)$$

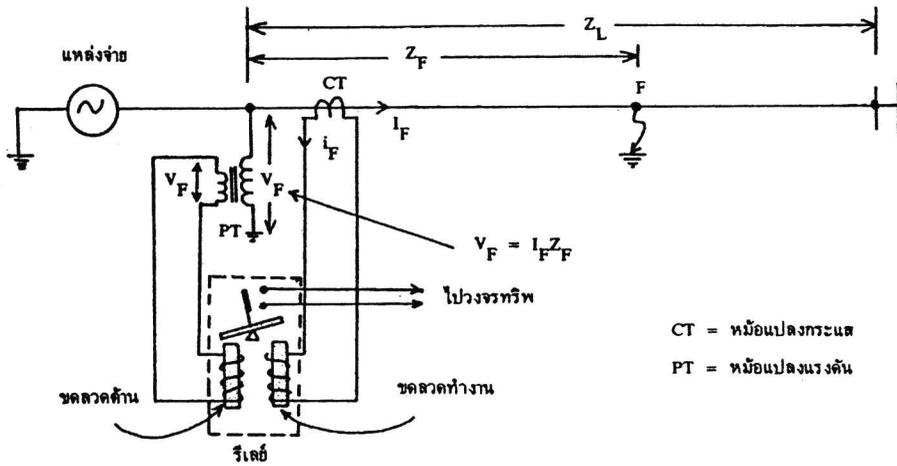


รูปที่ 2.2 แสดงระนาบเชิงซ้อนของกระแสฟอลต์และกราฟเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

เนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันของกระแสฟอลต์ จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดความเร็วในการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน ซึ่งจะแปรผกผันกับขนาดของกระแสคือ กระแสฟอลต์มากแสดงว่าฟอลต์มีความรุนแรงมากและอยู่ใกล้จุดที่ติดตั้งรีเลย์มากกว่าจึงต้องมีการทำงานที่รวดเร็วกว่า ในขณะที่กระแสฟอลต์ที่ต่ำลงมาแสดงว่าฟอลต์มีความรุนแรงต่ำกว่าและอยู่ไกลออกไปจะมีการทำงานที่ช้ากว่า ซึ่งเวลาในการทำงานนี้ผู้ใช้จะต้องกำหนด (Setting) ให้รีเลย์ ตามรูปที่ 2.2 (b)

2.1.2 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)

การทำงานของรีเลย์ชนิดนี้อาศัยการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50 หรือ 60 Hz) จากกระแสและแรงดันด้วยการแปลงฟูเรียร์ตามหลักการของคลื่นเดินทาง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ซึ่งปกติจะอยู่ที่ปลายของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.3



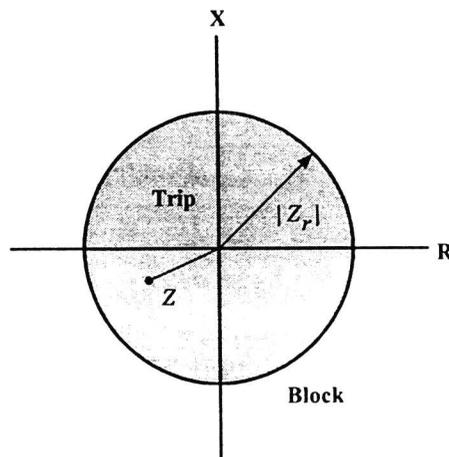
รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้งและหลักการการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay)

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั้นได้มาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันและกระแสดังสมการที่ 2.2

$$Z = \frac{V}{I} \tag{2.2}$$

ขั้นตอนในการตัดสินใจของรีเลย์จะใช้การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตอบสนองเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ (Z_r) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\begin{aligned} |Z_r| > |Z| & \text{ trip} \\ |Z_r| < |Z| & \text{ block} \end{aligned} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.4 แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง

จากการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์นี้เองทำให้บางครั้งจะเรียกรีเลย์รูปแบบนี้ว่า อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) และถ้าพิจารณาในระนาบเชิงซ้อนทางเดินของ โลกัส (locus) จะมีลักษณะเป็นวงกลมมีรัศมี $|Z_r|$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงดันและกระแสที่พิจารณาจากรีเลย์ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งในรูปที่ 2.3 ในสภาวะปกตินั้นรีเลย์จะมองค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งอยู่นอกวงกลมรัศมี $|Z_r|$ ดังนั้นจะไม่มีคำสั่งให้เบรกเกอร์ปลดวงจร แต่ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้นค่าของแรงดันจะลดลงในขณะที่ค่าของกระแสเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.2 พบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ตามรูปที่ 2.2 และถ้าค่าอิมพีแดนซ์ลดต่ำลงมากกว่ารัศมี $|Z_r|$ รีเลย์ก็จะเริ่มทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ (โหนดของรีเลย์ คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นหรือไม่

ผลการลดลงของอิมพีแดนซ์นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ในสภาวะปกติ และค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวก็สามารถที่จะคำนวณหาระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ ดังสมการที่ 2.4

$$Location = \frac{Z}{m} = \frac{V}{mI} \quad (2.4)$$

เมื่อ m คือค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว (ohm/km)

จากจุดนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในระบบการป้องกันแบบโซน (Zone protection) ได้ สำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ว่าเกิดที่เฟสใดนั้นอาศัยการพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟส รวมการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์เพื่อบอกว่าเป็นการลัดวงจรลงดิน (Ground fault) หรือไม่

2.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ในทุกหนทุกแห่งรอบๆ ตัวเราประกอบไปด้วยสัญญาณต่างๆ มากมายที่มนุษย์นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การสั่นของแผ่นดินไหว เสียงพูดของมนุษย์ การสั่นของเครื่องยนต์ และการจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ เหล่านี้จะใช้ทฤษฎีเวฟเล็ตเป็นเครื่องมือสำหรับอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณ ซึ่งมีความสำคัญต่อสาขาการประมวลผลสัญญาณมาก ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของเวฟเล็ต และนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยได้

2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT)

การแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูรีเยร์และการแปลงฟูรีเยร์ช่วงสั้น) แต่ได้พัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ สามารถ

ปรับเปลี่ยนขนาดหน้าต่าง (windows) ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่น้อยลง ในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory)

ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ตามแนวแกนอนและขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์ทั้งทางด้านบวกและด้านลบอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตคือการนำกลุ่มของเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการสเกล (Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ตแม่นั้นเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ตแบบ Morlet

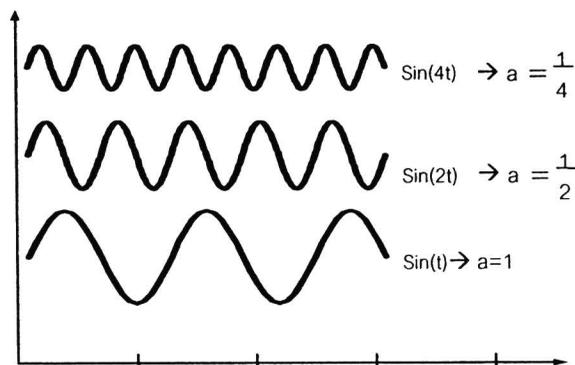
ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ดังนี้

$$\psi_{a,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) \quad (2.5)$$

$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ k ตามลำดับ โดยที่เวฟเล็ตแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า a และ k แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเล็ตแม่เดิมอยู่ และเพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ เพื่อให้เห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะขออธิบายถึงเวฟเล็ตที่มีการสเกลและเลื่อนตำแหน่งดังนี้

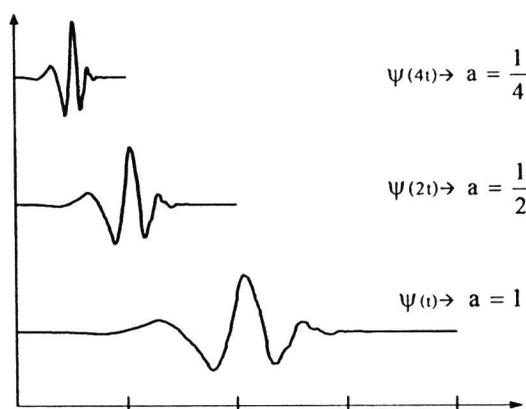
2.2.1.2 การสเกล (Scaling : a)

การวิเคราะห์เวฟเล็ทจะแสดงให้เห็นถึงเวลาและขนาดของสัญญาณ การสเกล (Scaling) จะหมายถึงการหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) ซึ่งเราจะให้ “a” แทนด้วยพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ทนั่นเอง หรืออาจเรียก “a” ว่าเป็นตัวประกอบขนาด (scale factor) และถ้าพิจารณาสัญญาณไซน์ที่มีตัวประกอบขนาดแตกต่างกันจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์

ตัวประกอบขนาด (a) จะมีผลในทางเดียวกันกับเวฟเล็ท ยิ่งถ้าตัวประกอบขนาดน้อยลงเท่าใด เวฟเล็ทจะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาเวฟเล็ทที่มีตัวประกอบแตกต่างกันจะปรากฏลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7

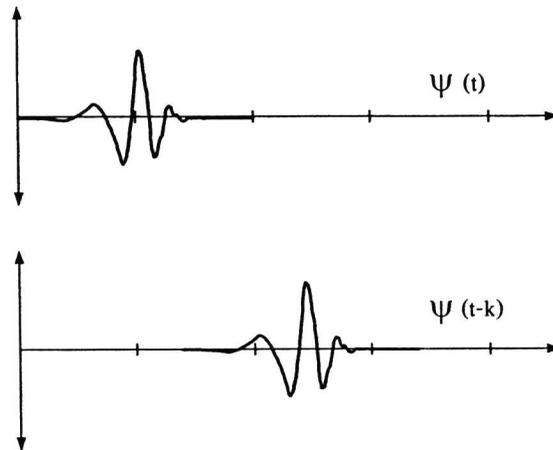


รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ท

2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k)

การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ทจะมีความหมายง่ายๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน $\Psi(t)$ ด้วย k จะแสดงได้โดย $\Psi(t-k)$ การเลื่อนตำแหน่งจะ

กำหนดโดยพารามิเตอร์ “k” ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็บบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ทที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ท

2.2.2 การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT)

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ทมาสู่การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยจำเป็นต้องกล่าวถึง การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA) โดยเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด a ซึ่งมี k หลายๆ ตำแหน่งมารวมกันให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุทจริง ซึ่งเรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform :DWT)” โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [6]

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (2.6)$$

โดยที่ a_0^m คือ การสเกล

$nb_0 a_0^m$ คือ การเลื่อนตำแหน่ง

m, n คือ เลขจำนวนเต็มบวก

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้นจากสมการที่ (2.6) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (2.7) [7]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (2.7)$$

เมื่อ m, n, k เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่

n คือ จำนวนข้อมูล

m คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

k คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ($a_0 = 2; b_0 = 1$) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้ [8]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k 2^m}{2^m}\right] \quad (2.8)$$