

บทที่ 2

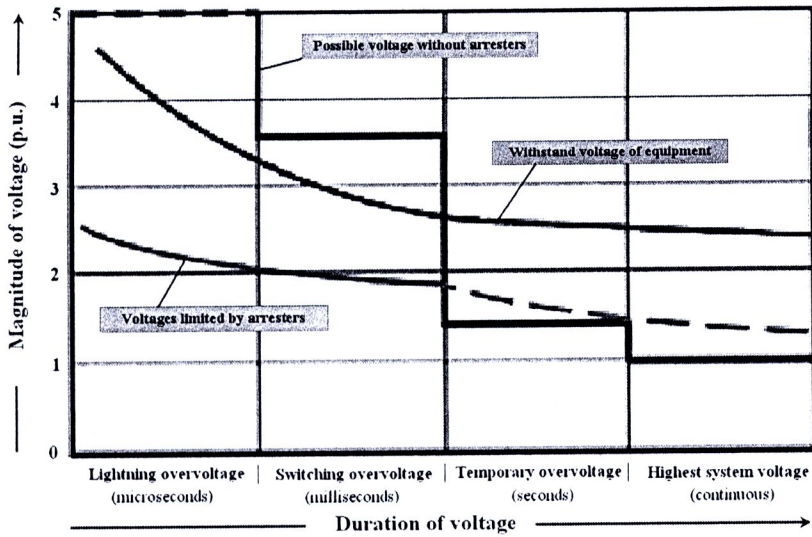
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของกัปดักเสิร์จแบบ ZnO ที่ใช้ป้องกันระบบกำลังไฟฟ้า

2.1.1 โครงสร้างทางกายภาพของกัปดักเสิร์จแบบ ZnO

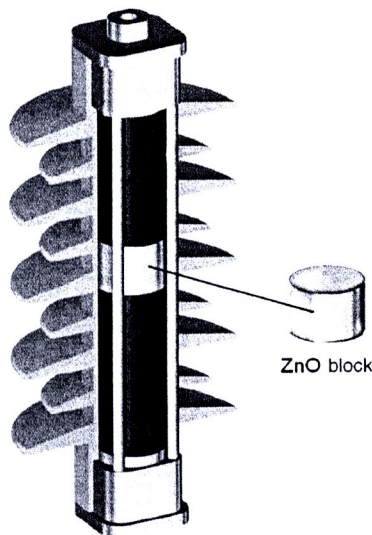
แรงดันเกินในระบบกำลังไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากฟ้าผ่า (lightning) การเกิดฟอลท์ (fault) หรือการปลดสับสวิตช์ (switching operation) ในระบบ แรงดันเกินจากสาเหตุเหล่านี้อาจมีค่าสูงจนเป็นอันตราย ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบกำลังไฟฟ้า เพื่อเป็นการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า และเพื่อทำให้เกิดความน่าเชื่อถือว่าระบบไฟฟ้าจะมีความมั่นคง ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจจากการขาดการให้บริการของระบบกำลังไฟฟ้า กัปดักเสิร์จจึงถูกนำมาติดตั้งใช้งานในเกือบทุกส่วนของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้า (electrical power network) เพื่อป้องกันปัญหาเหล่านี้ ในปัจจุบันกัปดักเสิร์จแบบไม่มีแถบชนิดซิงค์ออกไซด์ (gapless zinc oxide-ZnO) ถูกนำมาใช้เพื่อการนี้อย่างกว้างขวาง โดยปกติกัปดักเสิร์จจะถูกติดตั้งไว้ระหว่างเฟสกับระบบกราวด์ (grounding system) ซึ่งจะทำหน้าที่จำกัดแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่าแรงดันคงทนของฉนวน (withstand voltage level)

รูปที่ 2.1 แสดงค่าในหน่วยเปอร์ยูนิต (per unit) ของแรงดันเกินที่มีโอกาสขึ้นไปสูงสุดเมื่อไม่มีกัปดักเสิร์จติดตั้งใช้งานอยู่ ในแกนเวลาจะแบ่งเป็นช่วงแรงดันเกินในย่านต่างๆ ได้แก่ แรงดันเกินจากฟ้าผ่า (lightning surge) ในย่านเวลาเป็นไมโครวินาที (μsec) แรงดันเกินจากการปลดสับสวิตช์หรือแรงดันเกินสวิตช์ (switching surge) ในย่านเวลาเป็นมิลลิวินาที (msec) และการเกิดแรงดันเกินชั่วคราวในย่านเวลาเป็นวินาที (sec) ในกรณีของแรงดันเกินเนื่องมาจากฟ้าผ่า และแรงดันเกินจากการปลดสับสวิตช์ ขนาดของแรงดันเกินจะมีค่าหลายเปอร์ยูนิต เมื่อเทียบกับแรงดันของระบบที่เป็นค่าอ้างอิง (reference base) กัปดักเสิร์จจะทำหน้าที่จำกัดแรงดันเกินให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันคงทนของอุปกรณ์ในระบบ โดยกัปดักเสิร์จจะนำกระแสเนื่องจากแรงดันเกินจากปรากฏการณ์ดังกล่าวมาแล้วในข้างต้นผ่านลงดิน ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดเจนถึงความสำคัญของกัปดักเสิร์จในการป้องกันแรงดันเกิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันเกินจากฟ้าผ่า และแรงดันเกินจากการปลดสับสวิตช์



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงขนาดของแรงดันเกินในย่านต่างๆ [14]

โครงสร้างของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO เป็นโครงสร้างอย่างง่าย โดยพื้นฐานประกอบด้วยเปลือกฉนวน เป็นโครงสร้างภายนอก (insulating housing) ทำจากพอร์ซเลน (porcelain) หรือโพลีเมอร์ (polymeric material) และ ส่วนทำงานภายใน (inner active column) ซึ่งประกอบด้วยวาริสเตอร์ชนิด ZnO (zinc oxide varistors) วางอัดซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



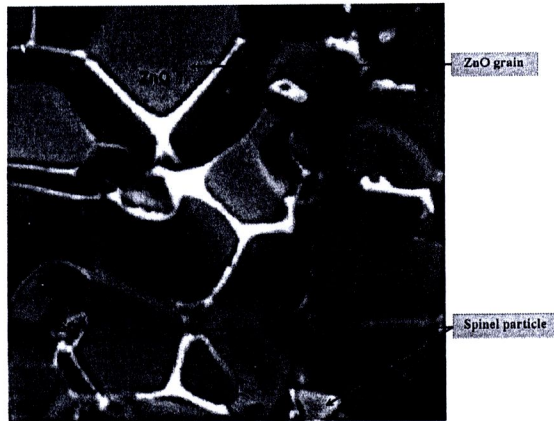
รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดของดักเสิร์จชนิด ZnO โครงสร้างภายนอกทำจากโพลีเมอร์ สำหรับแรงดันระบบจำหน่าย [31]

วาริสเตอร์บล็อกอิลิเมนต์ชนิด ZnO (ZnO varistor block elements) เป็นส่วนประกอบหลักของกับดักเสิร์จชนิด ZnO ซึ่งจะทำให้เกิดคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (non-linear characteristics) ตามต้องการ และมีความสัมพันธ์ที่แน่นแฟ้นกับอุณหภูมิในย่านกระแสต่ำ (low current range) คุณลักษณะความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (non-linear resistivity) เป็นคุณสมบัติตามธรรมชาติ ของความต้านทานแบบเซรามิกผสม (composite ceramic resistor) ทั้งหมดซึ่งมี ZnO เป็นองค์ประกอบหลัก เทียบกับปริมาณส่วนผสมอื่นๆ ที่เติมลงไป (additives) อันได้แก่ Bi_2O_3 , CoO_2 , MnO_3 , และ Sb_2O_3 [15, 16] ส่วนผสมต่างๆ เหล่านี้มีความจำเป็นเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้า (electric properties) ตามต้องการ

2.1.2 คุณสมบัติทางแรงดันและกระแสของวาริสเตอร์บล็อกชนิด ZnO

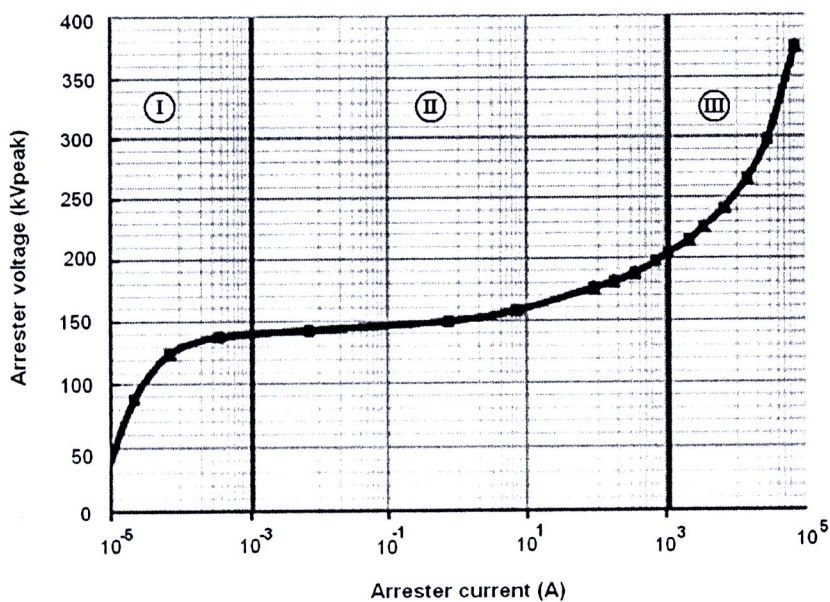
โครงสร้างของกับดักเสิร์จชนิด ZnO ซึ่งประกอบด้วย ZnO ความบริสุทธิ์สูงเป็นส่วนประกอบหลัก และสารเจือปนจำนวนน้อย คือ ออกไซด์ของ bismuth (Bi), cobalt (Co), manganese (Mn), antimony (Sb) และอื่นๆ ส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกผสมให้เข้ากันเป็นเม็ด (granulated) อัดขึ้นรูปเป็นแผ่น (pressed disc) นำไปผ่านกรรมวิธีพิเศษเพื่อสร้างชั้นความต้านทานสูง (high-resistance layers) บนทุกด้านของชิ้นส่วน และสุดท้ายนำไปเผา (sintered) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C อัตราส่วนผสม (blend ratio) ของ ZnO และส่วนผสมอื่น (additives) ไม่คงที่ แต่โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 9:1 [22] โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของชิ้นส่วนที่ได้นี้สามารถเห็นได้จากภาพ ซึ่งถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอน EMPA (Electron Probe Micro Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะสามารถมองเห็นเกรนของ ZnO ขนาด 1 ถึง $10\ \mu\text{m}$ ชั้นของขอบเกรน (intergranular) ประกอบด้วย Bi_2O_3 เป็นหลัก และสปิเนล (spinel) $\text{An}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$ กระจายอยู่ในวงรอบของเกรน (grain boundary)

คุณลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงที่ดี ทางแรงดันและกระแส (voltage-current nonlinear characteristics) ของอิลิเมนต์ จะเนื่องมาจากรอยต่อ (junction) ของเกรน ZnO และชั้นของขอบเกรน (intergranular layer) ซึ่งประกอบด้วย Bi_2O_3 เป็นหลัก ขณะที่ความต้านทานจำเพาะ (specific resistivity) ของเกรน ZnO มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง $10\ \Omega\text{cm}$ ชั้นของขอบเกรน (intergranular layer) จะมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง $10^{10}\ \Omega\text{cm}$ ดังนั้นแรงดันเกือบทั้งหมดที่จ่ายเข้าไปที่อิลิเมนต์ จะรวมกันอยู่ (concentrated) บนชั้นของขอบเกรน ซึ่งมีความต้านทานสูง (high-resistivity) ที่เลเยอร์ (layer) นี้ จะควบคุมให้เกิดคุณลักษณะไร้ความต้านทาน (non ohmic characteristic) ซึ่งความต้านทานจะลดลงแบบเฉียบพลัน (decreases suddenly) เมื่อแรงดันที่ป้อนให้เพิ่มจนถึงค่าทำงานค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.3 ภาพขยายจากกล้องอิเล็กตรอนแสดงส่วนประกอบโครงสร้างของกับดักเสิร์จชนิด ZnO [3]

คุณลักษณะเฉพาะทาง แรงดันและกระแส (voltage-current characteristic) ของเลเซอร์นี้จะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตรง (non-linearity) ตลอดช่วงกระแสตั้งแต่ $10\ \mu\text{A}$ จนถึง $10\ \text{kA}$ ความไม่เป็นเชิงเส้นตรงของอิลิเมนต์นี้ เนื่องมาจากการผสมผสานกัน (combination) ของฉนวน (ในที่นี้คือ intergranular layer) และเกรนของ ZnO รูปที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะทาง แรงดันและกระแส ของ ZnO อิลิเมนต์ ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ย่านกระแสต่ำ (region I) ย่านการทำงาน (region II) และย่านกระแสสูง (region III)



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะเฉพาะทางแรงดันและกระแสของ ZnO อิลิเมนต์ [15, 16]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของกระแสและสนามไฟฟ้า (current density-electric field) J-E ในย่านกระแสต่ำ (region I) จากมุมมองทางกายภาพ (physical point of view) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$J = J_0 \exp\left\{-\frac{\phi - \beta E^{0.5}}{kT}\right\} \tag{2.1}$$

เมื่อ $\beta = (e^{0.75\pi} \epsilon_0 \epsilon_0)$, ϕ คือ potential barrier (Å), E คือ electric field intensity (V/m), k คือ Boltzmann constant, T คือ absolute temperature (°K), e คือ electron charge (C), ϵ_0 คือ vacuum dielectric permittivity, และ ϵ คือ relative permittivity ของ barrier substance สมการที่ (2.1) แสดงให้เห็นโดยชัดเจนว่า ในย่านกระแสต่ำ (region I) คุณลักษณะของ ZnO อิลิเมนต์ (characteristics) จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุณหภูมิ T เมื่อจ่ายแรงดันที่ความถี่ใช้งาน (line-frequency voltage) ให้กับดักเสิร์จชนิด ZnO ที่ย่านนี้ จึงมีนัยที่จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ (characteristic change) ต่อระยะเวลาที่จ่ายแรงดัน (energized time) และความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (temperature dependence) ของ ZnO อิลิเมนต์

ในย่านการทำงาน (region II) จะพิจารณาให้ค่าความเข้มของกระแส (current density) เป็นสัดส่วน (proportional) กับความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field intensity) ซึ่งสามารถอธิบายด้วย Fowler-Nordheim tunnel effect

$$J = J_0 \exp\left(\frac{\gamma}{E}\right) \tag{2.2}$$

เมื่อ $\gamma = \frac{4(2m)^{\frac{1}{2}}}{3he}$, m คือ electron mass, และ $h = \hbar/2\pi$ โดยที่ $\hbar$ คือ Planck's constant ความไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinearity) ตามปกติจะได้จากสมการซึ่งมาจากการทดลอง (experimental expression)

$$I = CV^\alpha \tag{2.3}$$

เมื่อ α คือ nonlinear exponent และ C เป็นค่าคงที่ ในการนำกับดักเสิร์จชนิด ZnO ไปใช้งาน ย่านการทำงาน (region II) นี้ จะมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะทางการป้องกัน (protective characteristics) เมื่อมีกระแสอิมพัลส์ (impulse current) ไหลผ่านกับดักเสิร์จ ยิ่ง α มีค่ามาก ก็ยิ่งทำให้คุณลักษณะทางการป้องกันดีมากขึ้นตามไปด้วย ในย่านกระแสสูง (region III) ค่าความต้านทานของเกรน ZnO จะถูกครอบงำ (dominant) และจะได้ characteristic ตามสมการ

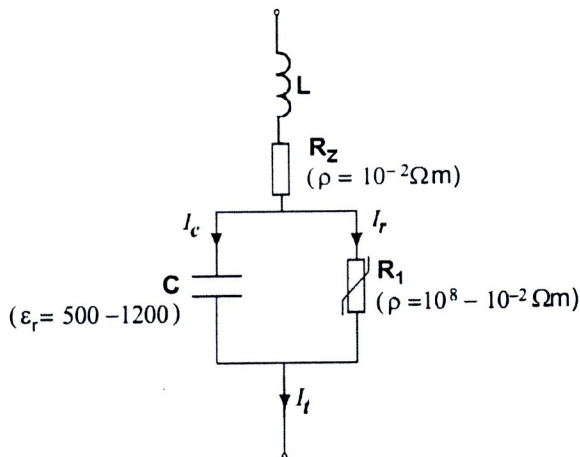
$$V \approx KI \tag{2.4}$$

เมื่อ K เป็นค่าความต้านทานของเกรน ZnO



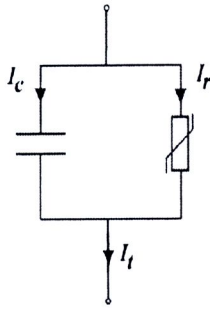
2.1.3 แบบจำลองของ ZnO arrester

คุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงดันและกระแส (non-linear voltage-current characteristic) ของกัปกัดเสิร์จชนิด ZnO ในย่านการทำงานกระแสต่ำ (region I) แสดงให้เห็นตามรูปที่ 2.5 [4, 5] ความต้านทาน R_1 จะแทนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นตรง ของชั้นเกรน (granular layers) เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะ (specific resistivity) ρ มีการเปลี่ยนแปลงจาก $10^8 \Omega\text{m}$ สำหรับสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดต่ำ (low electric field stress) ไปจนถึงต่ำกว่า $0.01 \Omega\text{m}$ สำหรับสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง (high electric field stress) ในแบบจำลอง คาปาซิเตอร์เทียบเคียง (equivalent capacitor) C จะแทนค่าคาปาซิเตนซ์ระหว่างชั้นชั้นเกรน ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) ระหว่าง 500 ถึง 1200 ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการผลิต R_Z คือค่าความต้านทานของเกรน ZnO ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ $0.01 \Omega\text{m}$ เพื่อที่จะนำผลของอัตราการเพิ่ม (rate of rise effects) เข้าไว้ด้วย จึงนำอินดักเตอร์มาต่ออนุกรมไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งค่า L หาได้จากรูปทรงทางเรขาคณิตในเส้นทางการไหลของกระแส



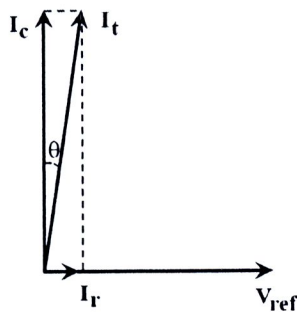
รูปที่ 2.5 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของ ZnO อิลิเมนต์

เมื่อค่า R_1 และ C เปลี่ยนแปลงไป กระแสรั่วคาปาซิทีฟ (I_c) และกระแสรั่วความต้านทาน (I_r) ก็จะเปลี่ยนแปลงค่าตามไปด้วย โดยเป็นที่ทราบกันว่าส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ลำดับ 3 ของกระแสรั่วโดยรวม ที่ไหลผ่านกัปกัดเสิร์จ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับการเสื่อมสภาพของกัปกัดเสิร์จชนิด ZnO [12, 7, 13, 18] ในย่านกระแสต่ำค่า R_Z จะมีค่าน้อยกว่า R_1 มาก และเมื่อไม่นำค่า L มาพิจารณา ดังนั้นในย่านแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (continuous operating voltage) จะได้แบบจำลองของกัปกัดเสิร์จชนิด ZnO ซึ่งประกอบด้วย non-linear resistor ต่อขนานกับ linear capacitive element ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [1, 2]



รูปที่ 2.6 วงจรเทียบเคียงอย่างง่ายของกับดักเสิร์จชนิด ZnO

กระแสรั่วไหลรวม I_t ของกับดักเสิร์จ เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของ ส่วนประกอบกระแสรั่วคาปาซิตีฟ I_c ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ และส่วนประกอบกระแสรั่วความต้านทาน I_r ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ทางมุมเฟส ของเวกเตอร์กระแสทั้งหมด



รูปที่ 2.7 แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของ I_t , I_c , I_r และแรงดันอ้างอิง

จากเวกเตอร์ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.7

$$I_t = I_r + jI_c \quad (2.5)$$

กระแสทั้งหมดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time dependent) ดังนั้นจะเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแส I_t , I_c และ I_r ในโดเมน (time domain) ได้ดังนี้

$$I_t(t) = I_r(t) + I_c(t) \quad (2.6)$$

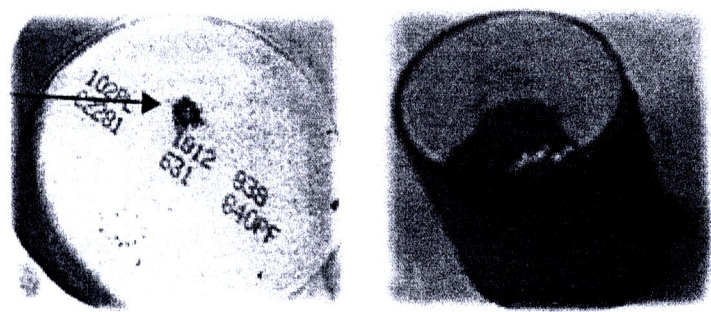
ส่วนประกอบของกระแสรั่วความต้านทาน จะหาได้จากการนำส่วนประกอบของกระแสรั่วคาปาซิตีฟ ไปลบออกจากกระแสรั่วไหลรวม ตามสมการ

$$I_r(t) = I_t(t) - I_c(t) \quad (2.7)$$

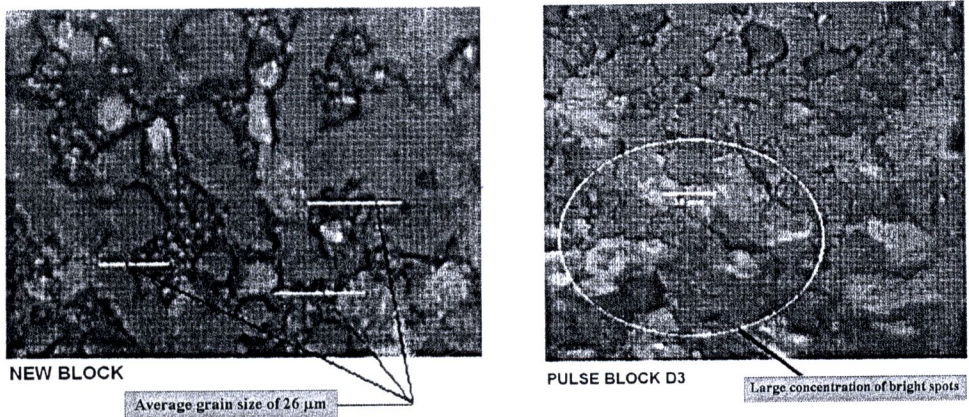
เมื่อจ่ายแรงดันให้กับดักเสริมที่ระดับแรงดันใช้งาน (continuous operating voltage) ซึ่งมีค่าประมาณ 80% ของแรงดันพิกัด (rated voltage) จะมีค่ากระแสรั่วไหลบางส่วนไหลผ่านกับดักเสริม ขนาดของกระแสรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับสภาพของกับดักเสริม กระแสรั่วไหลรวมจะประกอบด้วย ส่วนประกอบของกระแสคาปาซิทีฟ และส่วนประกอบของกระแสความต้านทาน โดยทั่วไปวาริสเตอร์บล็อกชนิด ZnO จะมีค่าคาปาซิแตนซ์จำเพาะ (specific capacitance) อยู่ที่ 75 pF kV/cm² และมีค่ากระแสคาปาซิทีฟอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 3 mA ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวาริสเตอร์บล็อก สำหรับกับดักเสริม ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ค่ากระแสคาปาซิทีฟจะขึ้นอยู่กับ จำนวนคอลัมน์ของวาริสเตอร์ (varistor columns) ที่นำมาต่อขนานกัน ค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ (stray capacitance) และแรงดันใช้งานจริง (actual operating voltage)

2.2 รูปแบบการเสื่อมสภาพและความเสียหายของกับดักเสริมแบบ ZnO

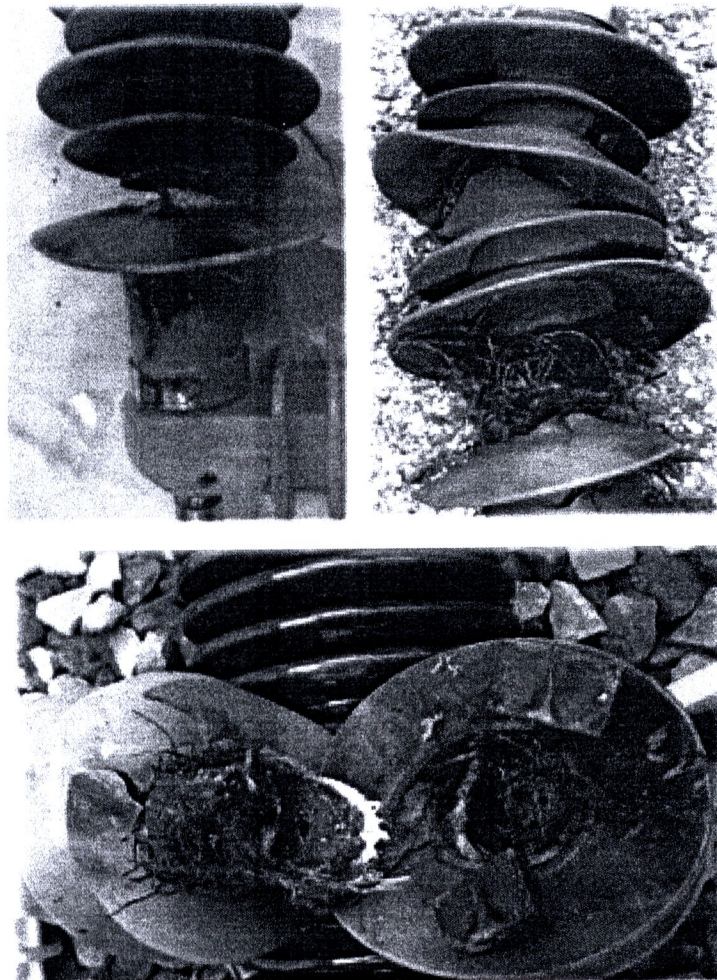
จากการเก็บข้อมูลภาคสนามและการศึกษาวิจัยมีพบว่า ความเสียหายของกับดักเสริม เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพจากการใช้งานของเนื้อสาร ZnO ที่ใช้ทำวาริสเตอร์บล็อก (varister block) ทำให้ค่าความต้านทานของวาริสเตอร์บล็อกลดลง และมีกระแสรั่วไหลเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ความร้อนจากความสูญเสียเพิ่มมากขึ้น จนในที่สุดจะเกิดความเสียหายของกับดักเสริมตามมา รูปที่ 2.8 แสดงสภาพความเสียหายของ ZnO บล็อก ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในกับดักเสริม รูปที่ 2.9 ภาพขยายแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาพของบล็อก ZnO ก่อนใช้งานและหลังจากมีกระแสจากแรงดันพัลส์ไหลผ่าน รูปที่ 2.10 – 2.12 แสดงความเสียหายของกับดักเสริมที่ได้การเก็บข้อมูลภาคสนาม



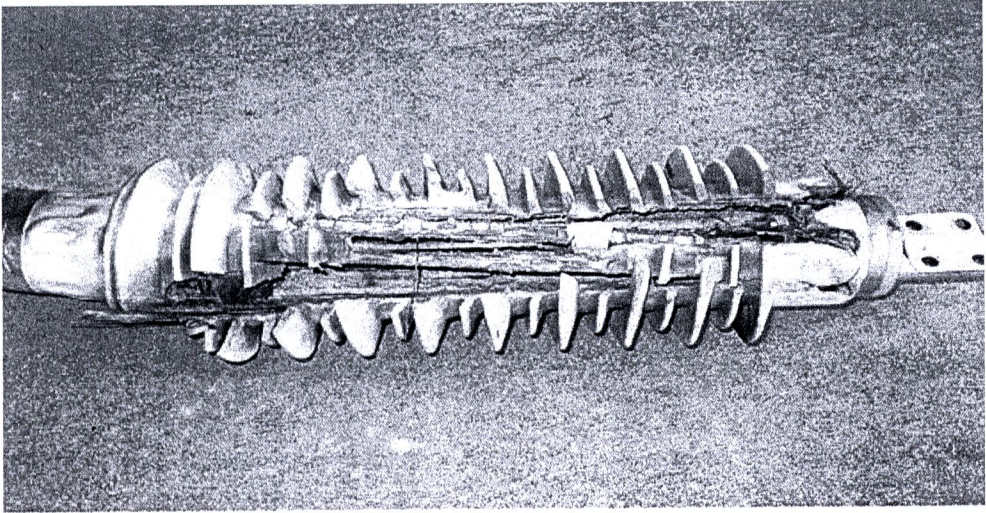
รูปที่ 2.8 สภาพความเสียหายของ ZnO บล็อก ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในกับดักเสริม
ที่มา : กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2010



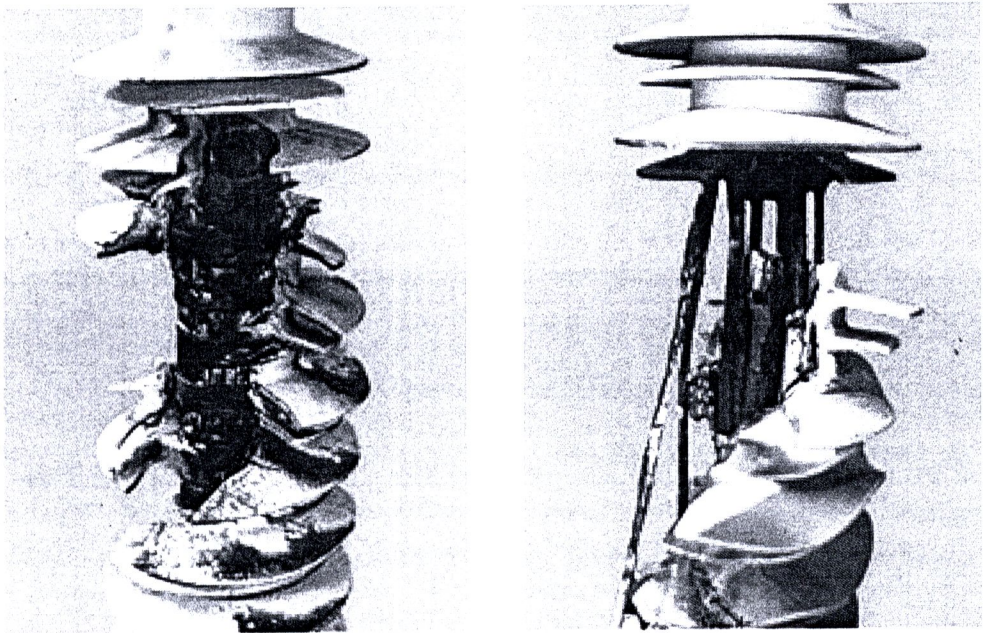
รูปที่ 2.9 ภาพขยายแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของบล็อก ZnO ก่อนใช้งานและหลังจากมีกระแสจากแรงดันพัลส์ไหลผ่าน [17]



รูปที่ 2.10 สภาพความเสียหายของกัปกัดเสิร์จจากการใช้งาน
ที่มา : กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2010



รูปที่ 2.11 สภาพความเสียหายของกั๊บดีดส์แบบที่มีเปลือกโครงสร้างทำจากโพลิเมอร์
ที่มา : Keith Hill , Surge Arrester And Testing, Doble Engineering Company , 2004



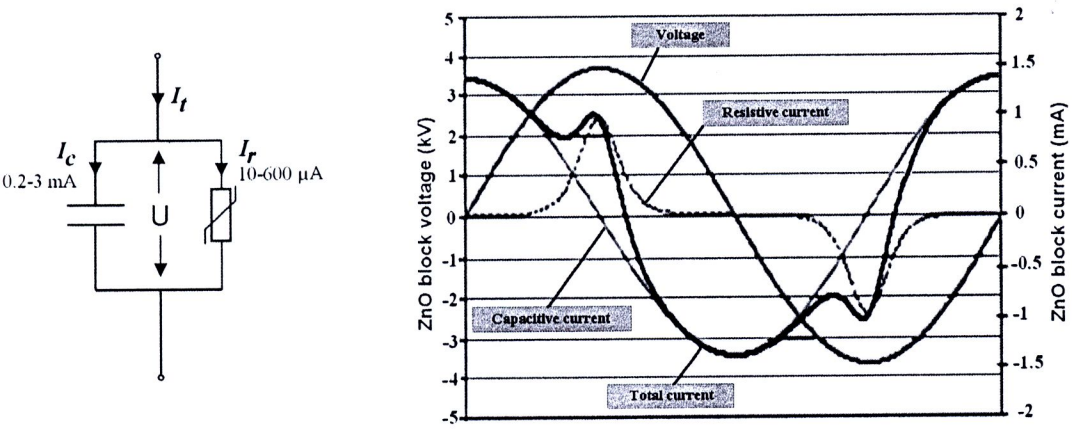
รูปที่ 2.12 สภาพความเสียหายของกั๊บดีดส์แบบที่มีเปลือกโครงสร้างทำจากโพลิเมอร์
ที่มา : James Taylor , ABB Power Products , Ludvika , Sweden

เนื่องจากคุณสมบัติทางความต้านทานของวาริสเตอร์ชนิด ZnO ไม่เป็นเชิงเส้นตรง กระแสรั่วจากความต้านทาน จึงมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกระแสรั่วความต้านทาน ดังนั้นถ้าเราแยกกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ออกมาจากกระแสรั่วไหลรวมของกัปกัปลีร้งที่ไหลผ่านสายกราวด์ลงดินได้ ก็จะสามารถนำผลไปใช้คาดคะเนการเสื่อมสภาพของกัปกัปลีร้งได้

แต่จากรายงานการศึกษาพบว่า ผลที่ได้จากการวัดกระแสรั่วฮาร์โมนิกอันดับ 3 ของกัปกัปลีร้ง จะสามารถใช้ในการบ่งบอกการเสื่อมสภาพของกัปกัปลีร้ง เฉพาะในบางกรณีเท่านั้น ไม่สามารถบ่งบอกการเพิ่มขึ้น ของกระแสความต้านทานเนื่อง จากความต้านทานที่ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากการเสื่อมสภาพทางเคมี หรือเมื่อมีความชื้นเข้าไปในกัปกัปลีร้ง [6]

2.3 เทคนิคการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของกัปกัปลีร้งชนิด ZnO

เมื่อกัปกัปลีร้งต่ออยู่กับระบบกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ จะมีกระแสรั่วไหลผ่านกัปกัปลีร้ง ซึ่งประกอบด้วยกระแสรั่ว 2 ส่วน คือกระแสรั่วคาปาซิทีฟ (capacitive leakage current) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2 mA – 3 mA กับกระแสรั่วความต้านทาน (resistive leakage current) มีค่าอยู่ในช่วง 10 μ A – 600 μ A ซึ่งมีขนาดต่ำกว่ากระแสรั่วคาปาซิทีฟมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เนื่องจากกระแสรั่วความต้านทานขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นฉนวนของ ZnO บล็อกในกัปกัปลีร้งโดยตรง จึงนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเสื่อมสภาพของกัปกัปลีร้ง ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทาง แรงดันและกระแส ตามสภาพของกัปกัปลีร้ง ขนาดของกระแสรั่วความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและระดับแรงดัน ดังนั้นการวัดค่ากระแสรั่วความต้านทาน จึงควรต้องระบุอุณหภูมิ และระดับแรงดันขณะทำการวัดไว้ด้วย



รูปที่ 2.13 ออสซิลโลแกรมของกระแสรั่วความต้านทาน (I_r) กระแสรั่วคาปาซิทีฟ (I_c) และ กระแสรั่วไหลรวม (I_t) ของกัปกัปลีร้ง [14]

ในทางปฏิบัติ การวัดกระแสรั่วไหลโดยเครื่องมือวัดกระแสตามปกติทั่วไป จะสามารถวัดได้เฉพาะกระแสรั่วไหลรวม ซึ่งประกอบด้วยกระแสรั่วคาปาซิทีฟ และกระแสรั่วความต้านทานรวมกัน โดยเหตุที่กระแสรั่วความต้านทานมีสัดส่วนที่น้อยมาก และยังมีมุมเฟสต่างจากกระแสรั่วคาปาซิทีฟ 90 องศา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสรั่วความต้านทาน จึงส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลรวมน้อยมาก อีกทั้งกระแสรั่วไหลรวมยังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการติดตั้งกับดักเสิร์จ จากการเปลี่ยนแปลงค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ตามลักษณะการติดตั้งกับดักเสิร์จ ดังนั้นแม้ว่าการวัดกระแสรั่วไหลรวมจะเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการตรวจสอบของกับดักเสิร์จเพราะง่ายและรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความไวในการตรวจจับสภาพความผิดปกติของกับดักเสิร์จ จึงต้องหาวิธีการ และเทคนิคที่เหมาะสม เพื่อหาค่าส่วนประกอบที่เป็นกระแสรั่วความต้านทานจากค่ากระแสรั่วไหลรวมรวม เพื่อนำมาใช้ในการประเมินสภาพของกับดักเสิร์จได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การหาค่ากระแสรั่วความต้านทานจากค่ากระแสรั่วไหลรวม สามารถแบ่งวิธีการวัดออกได้เป็น 3 รูปแบบหลัก โดยแต่ละรูปแบบยังแบ่งย่อยออกได้หลายวิธี [11]

รูปแบบ A การวัดกระแสรั่วความต้านทานโดยตรง แบ่งออกได้เป็น 4 วิธี (A1 – A4) ตามวิธีการที่ใช้ในการแยกกระแสรั่วความต้านทานออกจากกระแสรั่วไหลรวม

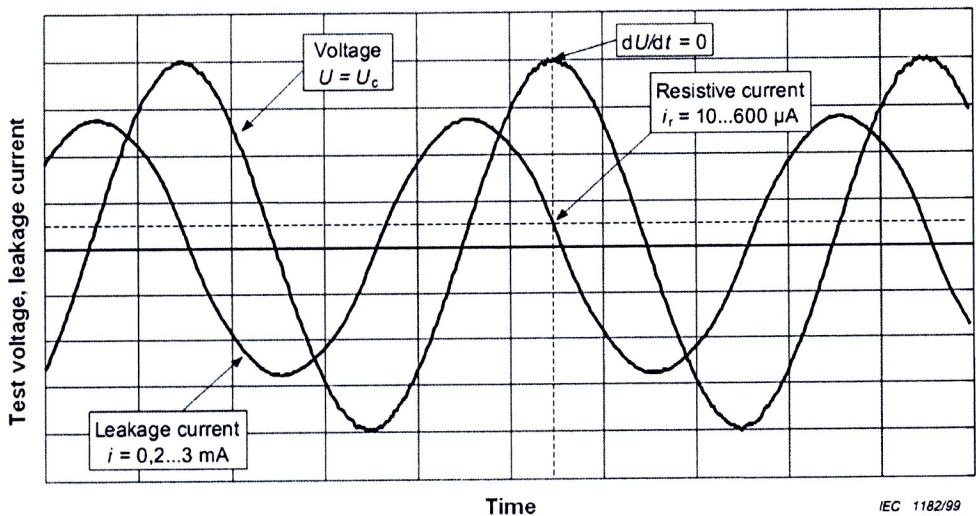
วิธี A1 การใช้สัญญาณแรงดันเป็นค่าอ้างอิง

ค่ากระแสรั่วความต้านทานสามารถหาได้จากค่ากระแสรั่วไหลรวม ในตำแหน่งที่แรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จมีค่าสูงสุด ($dU/dt = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เพราะที่ตำแหน่งนี้ กระแสรั่วคาปาซิทีฟจะมีค่าเป็นศูนย์ ค่าที่วัดได้จึงเป็นค่ายอดของกระแสรั่วความต้านทาน วิธีการนี้มักนำไปใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อย่างแม่นยำเพียงพอ เนื่องจากสามารถใช้โวลเตจไดวิเดอร์ (voltage divider) ที่มีความคลาดเคลื่อนของมุมเฟสต่ำๆ วัดแรงดันแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จ เพื่อเป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิง

ในทางปฏิบัติ ความเที่ยงตรงจะถูกจำกัด โดย เฟสชิฟต์ (phase-shift) ของสัญญาณอ้างอิง และความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟส ที่ตกคร่อม ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงชนิดเมทัลออกไซด์ (non-linear metal oxide resistors) ด้านปลายที่ต่อลงดินของกับดักเสิร์จ จากการการกระจายแรงดันที่ไม่สม่ำเสมอตามความยาวของกับดักเสิร์จ อันเป็นผลมาจากอิทธิพลของสเตรย์คาปาซิแตนซ์ที่กระทำต่อดินและอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียง นอกจากนั้นถ้าแหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์โมนิกปนอยู่ด้วย ก็ส่งผลให้ความแม่นยำของวิธีนี้ลดน้อยลง



การนำวิธีการนี้ไปใช้งานในภาคสนามอาจจะไม่สะดวก เนื่องจากจะต้องมีสัญญาณแรงดันมาใช้อ้างอิง การต่อชั่วคราวเข้ากับทางด้านแรงต่ำของ หม้อแปลงวัดแรงดันมีความยุ่งยากมาก อีกทั้งกระแสคาปาซิทีฟ ซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นในสายต่อลงดินของกัปดัก เสรีจ จากเฟสข้างเคียง ก็ส่งผลให้ความแม่นยำลดลง



รูปที่ 2.14 การหากระแสรั่วความต้านทานจากกระแสรั่วไหลรวม ที่ค่ายอดของแรงดัน [11]

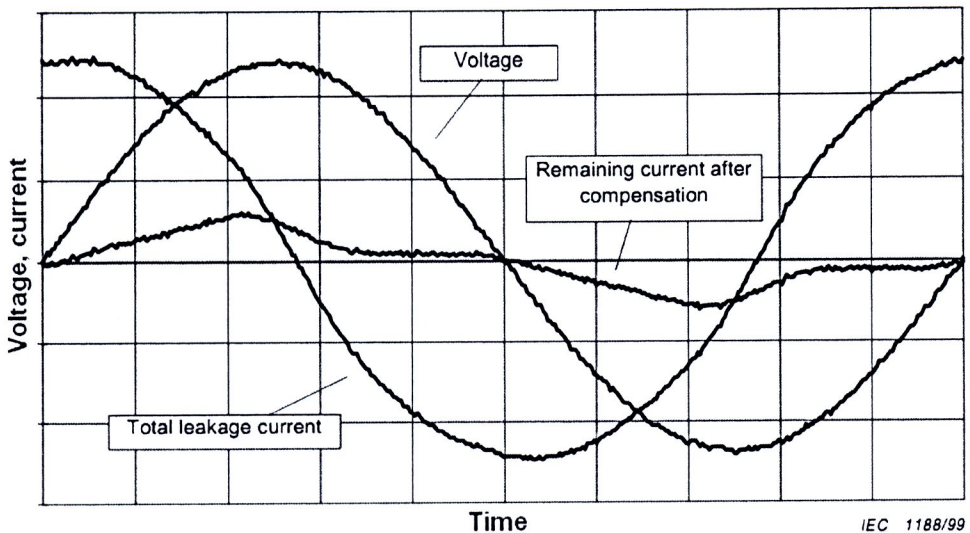
วิธี A2 การชดเชยส่วนประกอบคาปาซิทีฟโดยใช้สัญญาณแรงดัน

วิธีนี้จะใช้สัญญาณแรงดันมาชดเชยส่วนประกอบคาปาซิทีฟ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความไวในการวัดค่ากระแสรั่วความต้านทานเพิ่มมากขึ้น โดยใช้หลักการของวงจร HV บริดจ์ (HV bridge) ซึ่งเมื่อปรับแขน คาปาซิทีฟ-รีซิสทีฟ จนทำให้ส่วนประกอบคาปาซิทีฟของกระแสรั่วไหลสมดุล คงเหลือแต่ส่วนความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งสามารถพิจารณาได้โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป ส่วนประกอบความต้านทานจะหาได้ ตรงตำแหน่งที่แรงดันมีค่าสูงสุด เช่นเดียวกับวิธี A1

บริดจ์จะสมดุลเมื่อแรงดันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งกระแสคาปาซิทีฟจะอยู่ที่ค่าสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม ค่าคาปาซิแตนซ์ของกัปดักเสรีจมีค่าไม่คงที่ โดยจะเพิ่มขึ้นตามแรงดัน ดังนั้นแม้ว่าจะปรับบริดจ์ชดเชยอย่างไร กระแสส่วนที่เหลือจึงไม่ได้มีเฉพาะส่วนประกอบความต้านทาน แต่จะคงมีส่วนประกอบคาปาซิทีฟรวมอยู่ด้วยเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เนื่องจากจะต้องมีสัญญาณแรงดันมาใช้อ้างอิง วิธีการนี้สามารถใช้ได้ดีกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ไม่สะดวกที่จะนำไปใช้งานในภาคสนาม และมีข้อจำกัด

เช่นเดียวกับวิธี A1 ความเที่ยงตรงจะลดลงเนื่องจาก เฟสชิฟท์ของแรงดัน และกระแส จากอิทธิพลของเฟสข้างเคียง



รูปที่ 2.15 กระแสคงเหลือหลังจากการชดเชยกระแสคาปาซิทีฟ [11]

วิธี A3 การชดเชยของคัปประกอบคาปาซิทีฟโดยไม่ใช้สัญญาณแรงดัน

วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณแรงดันมาอ้างอิง โดยอาศัยหลักการสังเคราะห์ สัญญาณอ้างอิงความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากกระแส รั่วไหล โดยการปรับขนาดและมุมเฟสให้เหมาะสม โดยอัตโนมัติหรือโดยอาศัย ออสซิลโลสโคป แล้วนำมาชดเชยส่วนประกอบคาปาซิทีฟของกระแสรั่วไหล วิธีการนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับความซับซ้อนที่ต่างๆ กัน

วิธีนี้สามารถนำไปใช้งานในภาคสนาม ปัญหาที่สำคัญของวิธีนี้คือฮาร์โมนิกที่ปนอยู่ใน แรงดัน ซึ่งทำให้มีกระแสฮาร์โมนิกคาปาซิทีฟไปรบกวนส่วนประกอบความต้านทาน อีกทั้งสัญญาณชดเชยที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นกระแสคาปาซิทีฟแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งไม่ สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง จึงมีปัญหาเรื่องความแม่นยำเช่นเดียวกับวิธี A2 อีกทั้ง เฟสชิฟท์ ของแรงดันและกระแส เนื่องจากการรบกวนของเฟสข้างเคียง ก็ส่งผลต่อความ แม่นยำด้วย เช่นเดียวกับวิธี A1 และ A2

วิธี A4 การชดเชยส่วนประกอบคาปาซิทีฟโดยการรวมกระแสรั่วไหลทั้งสามเฟส

วิธีการนี้ใช้สมมุติฐานที่ว่า การนำกระแสรั่วไหลจากกับดักเสิร์จทั้งสามเฟสมารวมกัน จะทำให้กระแสคาปาซิทีฟทั้งสามเฟสหักล้างกันหมดไป คงเหลือแต่ฮาร์โมนิกของ

กระแสความต้านทานจากกับดักเสรีทั้งสามเฟส เนื่องจากกระแสความต้านทานที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีขนาดเท่ากัน ก็จะหักล้างกันหมดเช่นเดียวกัน โดยเมื่อกระแสคาปาซิทีฟยังคงที่ ถ้ากับดักเสรีตัวใดมีกระแสความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้กระแสผลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันเป็นสัญญาณอ้างอิง

วิธีนี้สามารถนำไปใช้งาน จากการนำวิธีการนี้ไปใช้งานในภาคสนาม พบว่ามีข้อเสียที่สำคัญ คือ ในสภาพความเป็นจริง กระแสคาปาซิทีฟของทั้งสามเฟสมีไม่ค่าเท่ากันตามสมมุติฐาน ค่าคาปาซิแตนซ์จะเท่ากัน เฉพาะเมื่อมีการควบคุมระยะทางเรขาคณิตอย่างดีเพียงพอเท่านั้น อย่างเช่นในสวิตช์เกียร์แบบฉนวนแกส นอกจากนี้ฮาร์โมนิกในแรงดันของระบบไฟฟ้า ก็ยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกในกระแสผลรวมด้วย ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสความต้านทาน

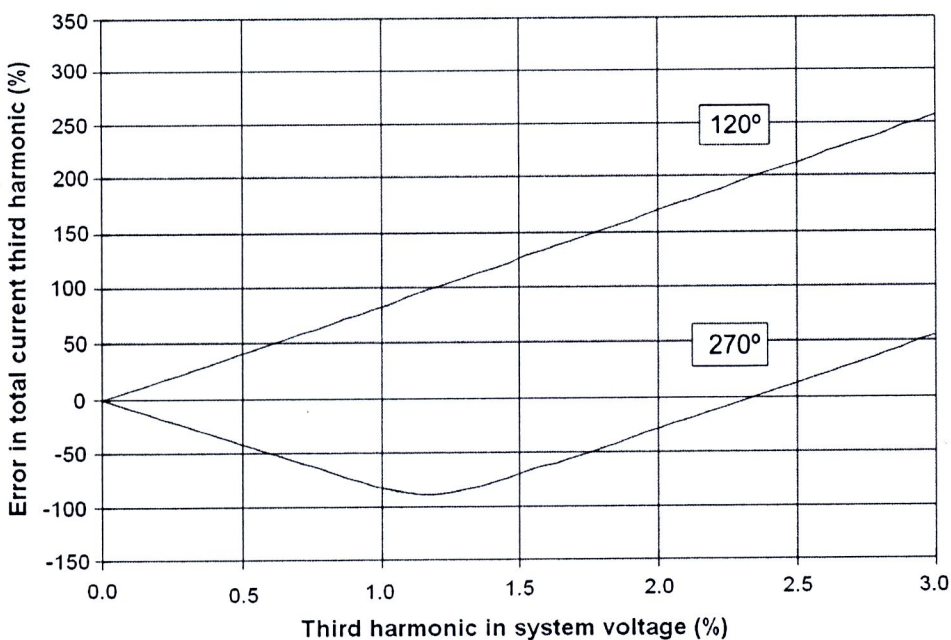
รูปแบบ B การหากระแสรั่วความต้านทานทางอ้อม ด้วยการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของกระแสรั่วไหลรวม แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี (B1 – B3) โดยอาศัยคุณลักษณะเฉพาะทางความต้านทานของวาร์ริสเตอร์บล็อกในกับดักเสรี ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง ทำให้เกิดส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกขึ้นในกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสรี โดยส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสรั่วความต้านทาน และระดับความไม่เป็นเชิงเส้นตรงของความต้านทาน ซึ่งแปรตามอุณหภูมิและขนาดแรงดัน โดยทั่วไปจะใช้ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสรั่วไหลรวม เป็นบ่งชี้ขนาดของกระแสรั่วความต้านทาน แต่การวัดปริมาณส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในกระแสรั่วไหลรวม อาจได้รับผลกระทบจากฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันไฟฟ้าของระบบ ซึ่งทำให้มีกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จากกระแสคาปาซิทีฟของกับดักเสรี รบกวนการวัดค่ากระแสรั่วความต้านทาน

วิธี B1 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3

วิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่า ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นตรง ทางคุณลักษณะ แรงดัน-กระแสของกับดักเสรี ทำให้เกิดส่วนประกอบฮาร์โมนิกในกระแสรั่วไหลรวม จากสมมุติฐานที่ให้ส่วนประกอบฮาร์โมนิกทั้งหมด เกิดจากกระแสรั่วความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง จึงไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันเป็นสัญญาณอ้างอิง ส่วนประกอบฮาร์โมนิก จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสรั่วความต้านทาน และระดับความไม่เป็นเชิงเส้นของคุณลักษณะ แรงดัน-กระแส ขนาดแรงดันและอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น จึงมีผลต่อการแปรเปลี่ยนส่วนประกอบฮาร์โมนิกด้วย

กระแสรั่วความต้านทานมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เป็นสัดส่วนสูงที่สุด ดังนั้นโดยส่วนใหญ่จึงมักเลือกใช้ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในการวัดกระแสรั่วความต้านทาน เพื่อตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ การแปลงค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ให้เป็นระดับกระแสรั่วความต้านทาน จะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต หรือข้อมูลจากการวัดในห้องปฏิบัติการ

วิธีนี้สามารถนำไปใช้งานในภาคสนาม จากการนำไปใช้งานพบว่ามีปัญหาหลักคือ ความอ่อนไหวต่อฮาร์โมนิกในแรงดันไฟฟ้าของระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกคาปาซิทีฟ ในขนาดที่ใกล้เคียงกับกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากความต้านทานที่ไม่เชิงเส้นตรง ของกัปดักเสิร์จ ทำให้กระแสฮาร์โมนิกที่วัดได้มีค่าผิดพลาด รูปที่ 2.16 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในฟังก์ชันของส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันระบบ จากรูปยังแสดงให้เห็นถึงผลจากฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันที่ขนาดและมุมเฟสค่าต่างๆ กัน



รูปที่ 2.16 แสดงย่านความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้จากการวัดกระแสรั่วความต้านทานที่ได้จากการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เมื่อมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันที่ขนาดและมุมเฟสค่าต่างๆ [32]

วิธี B2 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่มีการชดเชยฮาร์โมนิกในแรงดัน

วิธีการนี้อาศัยหลักการเดียวกันกับ วิธี B1 แต่ลดความอ่อนไหวจากผลของฮาร์โมนิกในแรงดันลง ด้วยการใส่สัญญาณกระแส เพื่อชดเชยกระแสฮาร์โมนิกคาปาซิทีฟลำดับที่ 3 ของกับดักเสิร์จ โดยสัญญาณกระแสชดเชยได้จากโพรบวัดสนามไฟฟ้า (field probe) ซึ่งวางในตำแหน่งตรงฐานของกับดักเสิร์จ หลังจากทำการปรับสเกลของกระแสฮาร์โมนิกที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้ามาที่โพรบให้เหมาะสม ก็นำไปหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกรวม จะได้ผลลัพธ์ของกระแสฮาร์โมนิก ที่เกิดจากกระแสความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักเสิร์จ การแปลงค่าฮาร์โมนิกให้เป็นระดับกระแสรั่ว ความต้านทาน ต้องอาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต ดังที่กล่าวไว้ในวิธี B1 วิธีนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จในภาคสนาม

วิธี B3 การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกอันดับ 1

วิธีการนี้จะหาส่วนประกอบมูลฐาน (fundamental component) ของกระแสรั่วความต้านทาน ซึ่งได้จากการกรองและการอินทิเกรต กระแสรั่วไหลรวม ทำให้ได้สัญญาณซึ่งเป็นปฏิภาคกับส่วนประกอบความต้านทาน

อิทธิพลจากฮาร์โมนิกในแรงดันไฟฟ้าของระบบ ไม่ส่งผลต่อการวัด เนื่องจากการใช้เฉพาะส่วนประกอบมูลฐานของแรงดันและกระแสเท่านั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือต้องการสัญญาณแรงดัน ซึ่งอาจได้มาจากหม้อแปลงวัดแรงดัน ความแม่นยำขึ้นกับเฟสชิฟท์ ของกระแสและแรงดัน เช่นเดียวกับวิธี A1 – A3

รูปแบบ C การหากระแสรั่วความต้านทานโดยตรงจากกำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียหาได้จากการอินทิเกรต ผลคูณของค่าชั่วขณะ (instantaneous value) ระหว่างแรงดัน กับ กระแสรั่วไหลรวม หารด้วยเวลา กำลังสูญเสียจะอยู่ในเทอมผลคูณของค่า r.m.s. ของกระแสรั่วความต้านทาน กับค่า r.m.s. ของแรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จ อิทธิพลของฮาร์โมนิกในแรงดันไฟฟ้าของระบบถูกทำให้ลดน้อยลงอย่างมากจากผลของกระบวนการคูณและการอินทิเกรต ข้อเสียหลักของวิธีการนี้คือต้องการสัญญาณแรงดัน ความแม่นยำในการวัดขึ้นกับเฟสชิฟท์ ของกระแสและแรงดันเนื่องจากเฟสขั้วเคียง เช่นเดียวกับวิธี A1 – A3

ตารางที่ 2.1 สรุปภาพรวมคุณลักษณะของการวัดกระแสรั่วไหลด้วยวิธีการวัดภาคสนาม (on-site) แบบต่างๆ ในด้านประสิทธิผลการนำไปใช้งาน และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการวัด

ตารางที่ 2.1 สรุปภาพรวมคุณลักษณะของการวัดกระแสรั่วไหลด้วยวิธีการวัดภาคสนามแบบต่างๆ ในด้านประสิทธิผลการนำไปใช้งาน และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการวัด [10, 11]

วิธีตรวจวัดกระแสรั่วไหล	วิธีการ	ความอ่อนไหวต่อ			ประสิทธิผลของการตรวจวิเคราะห์		การนำไปใช้งาน
		ฮาร์โมนิกของแรงดัน	เฟสชิฟท์ในการวัดกระแสหรือแรงดัน	กระแสที่ผันวน	คุณภาพของข้อมูล	ความซับซ้อนในการจัดการ	
การวัดกระแสรั่วไหลรวม		ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	แพร่หลาย
การวัดกระแสรั่วความต้านทาน							
– โดยใช้แรงดันอ้างอิง	A1	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง	จำกัด
– โดยการชดเชยคาปาซิเตอร์	A2	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง	จำกัด
– โดยการชดเชยด้วยการสังเคราะห์	A3	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ไม่มีข้อมูล
– โดยการหักล้างกระแสคาปาซิตีฟ	A4	สูง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ	จำกัด
การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของกระแสรั่วไหล							
– โดยใช้ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3	B1	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ	แพร่หลาย
– โดยใช้ฮาร์โมนิกลำดับ 3 ที่มีการชดเชย	B2	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	mean	แพร่หลาย
– โดยใช้ฮาร์โมนิกลำดับที่ 1	B3	ต่ำ	สูง	สูง	สูง	สูง	จำกัด
การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	C	ต่ำ	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง	ไม่มีข้อมูล

2.4 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การวัดกระแสรั่วความต้านทาน ในขณะที่กับดักเสิร์จติดตั้งใช้งานอยู่ในระบบ โดยวัดค่ากระแสรั่วไหลรวมจากกับดักเสิร์จ แล้วนำมาวิเคราะห์หากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จะเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการไปใช้งานในภาคสนาม เพราะไม่ต้องยุ่งยากเกี่ยวกับการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันเข้ากับระบบขณะใช้งาน อันอาจเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และอาจเป็นสาเหตุของการขัดข้องด้านการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามส่วนประกอบแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันระบบ ซึ่งทำให้มีส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในกระแสคาปาซิทีฟ ซึ่งจะไหลรวมกับกระแสความต้านทานเป็นกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จ มีผลทำให้การวัดค่ากระแสความต้านทานคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จากการศึกษาวิจัยยังค้นพบอีกว่า นอกจากขนาดเปอร์เซ็นต์ของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดแล้ว มุมเฟสของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ยังมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของการวัดกระแสความต้านทานอย่างมากด้วย

ดังนั้นในการออกแบบระบบแสดงสถานะของกับดักเสิร์จโดยการแยกกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ออกจากกระแสรั่วไหลรวม ควรจะต้องมีการชดเชยผลจากขนาดและมุมเฟสแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันระบบด้วย

งานวิจัยนี้จะใช้วิธี การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกอันดับ 3 แบบมีการชดเชยฮาร์โมนิกในแรงดัน (วิธี B2) [10, 11] ซึ่งจะใช้แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิเคราะห์กระแสรั่วไหล และใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นเครื่องมือในขั้นตอนวิธี (algorithm) แยกส่วนประกอบกระแสรั่วความต้านทานออกจากกระแสรั่วไหลรวม โดยจะมุ่งเน้นไปที่ย่านกระแสต่ำ (region I) ที่ระดับแรงดันใช้งานของระบบกำลังไฟฟ้า