**หน่วยที่ 5**

**การป้องกันการเกิดกระแสลัดวงจร**

**บทเรียน เรื่อง การคำนวณกระแสลัดวงจร**

**จุดประสงค์การสอน**

5.1 เข้าใจหลักการคำนวณกระแสลัดวงจร

5.1.1 อธิบายพื้นฐานเบื้องต้นในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร

5.1.2 อธิบายขั้นตอนการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร

**5.1 การคำนวณกระแสลัดวงจร**

ในการเลือกใช้บริภัณฑ์และระบบไฟฟ้านั้น นอกจากจะคำนึงถึงกระแสขณะใช้งานปกติแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงกระแสขณะที่ลัดวงจรด้วย การลัดวงจรหมายถึงการที่วงจรไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดโดยอุบัติเหตุหรือความไม่ตั้งใจ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลงส่งผลให้กระแสไหลมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า กระแสลัดวงจรจะทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical Stress) และความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) ขึ้น ซึ่งสามารถส่งผลทำให้บริภัณฑ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

**5.1.1 พื้นฐานเบื้องต้นในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร**

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้า เพื่อที่จะเลือกบริภัณฑ์ประธานที่เหมาะสม

**5.1.1.1 มาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร**

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้าเพื่อที่จะได้เลือกบริภัณฑ์ที่เหมาะสม หลายประเทศจึงได้มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจร และเพื่อให้การคำนวณเป็นไปในแนวเดียวกัน ทาง IEC (International Electrotechnical Commission) จึงได้ร่างมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น คือ IEC 60909 “Short-Circuit Current Calculation in Three-Phase A.C. System”

มาตรฐาน IEC 60909 ได้แบ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Far-from-generator Short Circuit)
2. การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Near-to-generator Short Circuit)

การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายไฟตลอดช่วงเวลาการลัดวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าคงที่ด้วย ส่วนการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กระแสลัดวงจรส่วน A.C. จะค่อย ๆ มีค่าลดลง

สถานประกอบการส่วนมากจะรับไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายแรงดันสูง แรงดันปานกลาง และแรงดันต่ำของทางการไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าดังที่กล่าวมานี้เป็นระบบที่ถือว่าไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น

โดยในบทเรียนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อเกิดการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น กระแสลัดวงจรจะเป็นผลของการะแส 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1. ส่วนประกอบ A.C. ซึ่งมีขนาดคงที่ ตลอดระยะเวลาการเกิดลัดวงจร
2. ส่วนประกอบ D.C. ซึ่งมีค่าสูงสุดค่าหนึ่ง และค่อย ๆ มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

นิยามที่สำคัญตาม IEC 60909 มีดังนี้

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I”k (Initial Symmetrical Short-circuit Current) หมายถึง ค่า R.M.S. ของส่วนประกอบ A.C. ของกระแสลัดวงจรขณะเริ่มลัดวงจร
2. กระแสลัดวงจรค่ายอด ip (Peak Short-circuit Current) หมายถึง ค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจร จากภาพที่ 5.1 จะเห็นว่า กระแสลัดวงจรค่ายอด ip จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาแรก ๆ ของการเกิดการลัดวงจร
3. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว Ik (Steady-state Short-circuit Current) หมายถึง ค่า R.M.S. ของกระแสลัดวงจรซึ่งยังคงมีอยู่หลังจากการลดลงของภาวะชั่วครู่ (Transient)
4. กระแสตัดวงจรแบบสมมาตร Ib (Symmetrical Short-circuit Breaking Current) หมายถึง ค่า R.M.S. ของส่วนประกอบ A.C. ของกระแสลัดวงจรขณะที่หน้าสัมผัสขั้วแรกของบริภัณฑ์สวิตชิ่งแยกออก
5. กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S”k (Initial Symmetrical Short-circuit (Apparent) Power) หมายถึง ค่าที่ได้จากผลคูณของกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I”k , แรงดันของระบบ Un และค่า 

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.1) |

1. แรงดันของระบบ Un (Nominal System Voltage) หมายถึง ค่าแรงดันระหว่างสาย ซึ่งระบบได้รับการออกแบบและลักษณะการทำงานได้อ้างอิงถึง

การลัดวงจรของระบบไฟฟ้าอาจแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

1. การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three-Phase Short Circuit)
2. การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน (Line to Line Short Circuit Without Earth Connection)
3. การลัดวงจรแบบสายถึงสายต่อกับดิน (Line to Line Short Circuit With Earth Connection)
4. การลัดวงจรแบบสายถึงดิน (Line to Earth Short Circuit)



1. Balance Time Phase Short Circuit
2. Line to Line Short Circuit Without Earth Connection
3. Line to Line Short Circuit With Earth Connection
4. Line to Earth Short Circuit

**ภาพที่ 5.1** ชนิดของการลัดวงจร

5.1.1.**2 แหล่งจ่ายไฟสมมูล**

ตาม IEC 60909 เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุดใด ๆ ในวงจรไฟฟ้า ณ จุดนั้นอาจจะแทนได้ด้วย แหล่งจ่ายไฟสมมูล (Equivalent Voltage Source) โดยที่แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนระบบไฟฟ้า เครื่องจักรกลซิงโครนัส และเครื่องจักรกล อซิงโครนัส จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ภายในของมัน

ภาพที่ 5.2 แสดงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร F ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแหล่งจ่ายไฟอื่น ๆ ในระบบให้มีค่าเป็นศูนย์

ที่ตำแหน่งลัดวงจร F แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่า  โดยที่ c คือตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor) และ Un คือแรงดันขอบระบบที่ใช้

ค่าตัวประกอบแรงดัน c จะมีค่าแตกต่างกันไปตามระบบแรงดันที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1



**ภาพที่ 5.2** แหล่งจ่ายไฟสมมูล

**ตารางที่ 5.1** ค่าประกอบแรงดัน (Voltage Factor c)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Nominal Voltage**  **Ua** | **Voltage Factor c for the Calculation of** | |
| **Maximum Short-**  **circuit Current**  **Cmax** | **Minimum Short-circuit Current**  **Cmin** |
| Low Voltage  100 V to 1000 V  (IEC Publication 38, Table I)   1. 230 V/ 400 V 2. Other Voltages | 1.05  1.10 | 0.95  1.00 |
| Medium Voltage  > 1 kV to 35 kV  (IEC Publication 38, Table III) | 1.10 | 1.00 |
| High Voltage  > 35 kV to 230 kV  (IEC Publication 38, Table IV) | 1.10 | 1.00 |

Note - cUa Should Not Exceed the Highest Voltage Um for Equipment of Power System

**5.1.1.3 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร**

ในการคำนวณกระแสลัดวงจร นอกจากจะต้องทราบค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูลแล้ว ยังจำเป็นต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรด้วย

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรอาจแบ่งเป็น 3 ส่วน ตามหลักของ Symmetrical Components คือ

Z(1)  Positive Sequence Impedance

Z(2)  Negative Sequence Impedance

Z(0)  Zero Sequence Impedance

Z(1)  ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

Z(1), Z(2), Z(0) ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบที่เหลือ

อิมพีแดนซ์ลัดวงจรอาจแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

- อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (Network Feeder)

- อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงชนิดสองขดลวด (Tow-wining transformers)

- อิมพีแดนซ์ของสายส่ง (Overhead Line and Cables)

- อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ Asynchronous motor (Induction motor)

**1. ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (Network Feeder)**

ขนาดของระบบไฟฟ้าอาจแทนได้ด้วยค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (Initial Symmetrical Short-circuit Power) S”kQ ถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากจนถือว่าเป็นบัสอนันต์ (Infinite Bus) จะได้ว่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก จนถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์

ภาพที่ 5.3 จะแสดงรูปของระบบและวงจรสมมูล สำหรับระบบไฟฟ้าทั้งกรณีที่มีหม้อแปลงและกรณีที่ไม่มีหม้อแปลง



**ภาพที่ 5.3** ระบบและวงจรสมมูล

พิจารณาการลัดวงจรในรูปที่ 5.3 (ก) ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล ZQ ของระบบที่จุด Q สามารถหาได้จากสมการที่ 5.2

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.2) |

ส่วนกรณีการลัดวงจรในภาพที่ 5.3 (ข) ซึ่งจ่ายไฟมาจากระบบแรงดันปานกลาง หรือแรงดันสูงผ่านหม้อแปลง ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล ZQt ซึ่งแปลงให้อยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงสามารถหาได้จากสามการที่ 5.3

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.3) |

เมื่อ UnQ = แรงดันของระบบ ที่จุด Q

S”kQ = กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ที่จุด Q

I”kQ = กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้อง ที่จุด Q

c = ตัวประกอบแรงดัน

tr = อัตราส่วนของแปลงพิกัด (Rated Transformation Ratio) โดยที่ Tap-Changer อยู่ในตำแหน่งหลัก

ในกรณีระบบมีแรงดันสูงกว่า 35 kV จ่ายด้วยสายส่งเหนือศีรษะ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล ZQ อาจพิจารณาเพียงค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว เป็น ZQ = jXQ

ส่วนในกรณีอื่น ๆ ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน RQ ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอน ให้ใช้ความสัมพันธ์

RQ = 0.1 XQ

โดยที่ XQ = 0.995 ZQ

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S”kQ และกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I”kQ นั้น สามารถหาได้จากทางการไฟฟ้าฯ สำหรับที่ระดับ 22 kV และ 24 kV นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ S”kQ = 500 MVA

โดยถ้าคำนวณตามสมการที่กล่าวมาแล้ว จะได้

ระบบ 400/230 V Zqt = 0.352 m Xqt = 0.35 m Rqt = 0.04 m

ระบบ 400/230 V Zqt = 0.382 m Xqt = 0.38 m Rqt = 0.04 m

**2. อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงชนิดสองขดลวด (Tow-wining transformers)**

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด Zt = RT + jXT สามารถคำนวณจากค่าพิกัดของหม้อแปลงดังนี้

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.4) |

เมื่อ UrT = แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ

IrT = กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ

SrT = กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง

PkrT = กำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงในขดลวดที่กระแสพิกัด

ukr = แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซนต์

uRr = แรงดันโอห์มมิก (Ohmique Voltage) พิกัด

อัตราส่วน X/R เพิ่มขึ้นตามขนาดของหม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ความต้านทานจะมีค่ำต่ำมาก ดังนั้นในการคำนวณหาขนาดกระแสลัดวงจรอาจให้ค่าอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยรีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียวแต่ค่าความต้านทานจะต้องนำมาคิดเมื่อต้องการคำนวณกระแสยอด (Peak Short Circuit)

สำหรับ Z(0)T = R(0)T + jX(0)T ของหม้อแปลงนั้นอาจหาได้จากบริษัทผู้ผลิต ดังตารางที่ 5.2 แต่สำหรับหม้อแปลงซึ่งต่อแบบ Delta-Wye อาจใช้ค่าโดยประมาณดังต่อไปนี้

Z(0)T = RT

X(0)T = 0.95 XT

อิมพีแดนซ์ ZT ที่หาได้คิดที่จุดแยกหลัก (Main Tapping Position) แต่หม้อแปลงอาจปรับไปใช้งานที่จุดต่อแยกใด ๆ ก็ได้ ที่จุดต่อแยกใหม่ ค่า ZT ใหม่ จะเปลี่ยนไป ดังนั้น เพื่อคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุดจึงจำเป็นต้องมีตัวคูณชดเชยตาม IEC 60909 เรียกตัวคูณนี้ว่า Impedance correction factors (KT) ค่า KT สามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.5) |

โดยที่ ZTK = อิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลง

ZT = อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

KT = Impedance Correction factors

XT = 

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ใหม่ของหม้อแปลงที่จะนำไปใช้ใจการคำนวณ คือ

ZTK = KTZT

**ตารางที่ 5.2** หม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ 400/230 V

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **พิกัด (kVA)** | **IFL (A)** | **%uk** | **PL (kW)** | **ZT (m)** | **RT (m)** | **XT (m)** |
| 315 | 455 | 4 | 3.9 | 20.32 | 6.29 | 19.32 |
| 400 | 577 | 4 | 4.6 | 16.00 | 4.60 | 15.32 |
| 500 | 722 | 4 | 5.5 | 12.80 | 3.52 | 12.31 |
| 630 | 909 | 4 | 6.5 | 10.60 | 2.62 | 9.82 |
| 800 | 1,155 | 6 | 11.0 | 12.00 | 2.75 | 11.68 |
| 1,000 | 1,443 | 6 | 13.5 | 9.60 | 2.16 | 9.35 |
| 1,250 | 1,804 | 6 | 16.4 | 7.68 | 1.68 | 7.49 |
| 1,600 | 2,309 | 6 | 19.8 | 6.00 | 1.24 | 5.87 |
| 2,000 | 2,887 | 6 | 24.0 | 4.80 | 0.96 | 4.70 |
| 2,500 | 3,608 | 6 | 26.8 | 3.84 | 0.69 | 3.78 |

**3. ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (Overhead Line and Cables)**

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร ZL = RL + jXL คำนวณได้จากข้อมูลต่าง ๆ ของตัวนำ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดและระยะศูนย์กลางของตัวนำ

ค่าความต้านทานประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว R’L ของสายเหนือศีรษะที่อุณหภูมิ 20oC สามารถคำนวณได้จากค่าพื้นที่หน้าตัด qn และค่าความต้านทานจำเพาะ  ดังนี้

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.6) |

โดยที่  = 

 = 

 = 

ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว X’L สำหรับสายเหนือศีรษะ สามารถคำนวณได้จาก

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.7) |

โดยที่ d = ระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ

r = รัศมีของตัวนำเดี่ยว ในกรณีของตัวนำบันเดิล จนแทน r ด้วย 

โดยที่ R คือรัศมีบันเดิล

n = จำนวรตัวนำบันเดิล

แทนค่า  เป็นค่าความซาบซึมได้ (Permeability) ของสุญญากาศ ดังนั้นสามารถ เขียนเป็นสมการได้ง่ายขึ้นเป็น

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.8) |

ค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้า ชนิดแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC มีค่า ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ส่วนตารางที่ 5.4 แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของบัสเวย์ ทั้งชนิดอะลูมิเนียและทองแดง

**ตารางที่ 5.3** สายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ขนาดสาย (ตร.มม.)** | **ค่าความต้านทาน (m/m)** | **ค่ารีแอกแตนซ์ (m/m)** |
| 2.5 | 7.400 | 0.155 |
| 4 | 4.625 | 0.141 |
| 6 | 3.083 | 0.131 |
| 10 | 1.850 | 0.121 |
| 16 | 1.156 | 0.113 |
| 25 | 0.740 | 0.107 |
| 35 | 0.529 | 0.103 |
| 50 | 0.370 | 0.100 |
| 70 | 0.264 | 0.097 |
| 95 | 0.195 | 0.096 |
| 120 | 0.154 | 0.094 |
| 150 | 0.123 | 0.092 |
| 185 | 0.100 | 0.091 |

**ตารางที่ 5.3 (ต่อ)** สายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ขนาดสาย (ตร.มม.)** | **ค่าความต้านทาน (m/m)** | **ค่ารีแอกแตนซ์ (m/m)** |
| 240 | 0.077 | 0.090 |
| 300 | 0.062 | 0.089 |
| 400 | 0.051 | 0.088 |
| 500 | 0.041 | 0.087 |

**ตารางที่ 5.4** บัสเวย์

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ขนาด (A)** | **อะลูมิเนียม (m/m)** | | **ทองแดง (m/m)** | |
| **ความต้านทาน** | **รีแอกแตนซ์** | **ความต้านทาน** | **รีแอกแตนซ์** |
| 225-600 | 0.1342 | 0.0350 | 0.0764 | 0.0350 |
| 800 | 0.0814 | 0.0216 | 0.0764 | 0.0350 |
| 1000 | 0.0712 | 0.0186 | 0.0623 | 0.0260 |
| 1200 | 0.0568 | 0.0150 | 0.0489 | 0.0216 |
| 1350 | 0.0407 | 0.0112 | 0.0417 | 0.0186 |
| 1600 | 0.0367 | 0.0098 | 0.0328 | 0.0150 |
| 2000 | 0.0292 | 0.0079 | 0.0240 | 0.0112 |
| 2500 | 0.0269 | 0.0071 | 0.0164 | 0.0079 |
| 3000 | 0.0210 | 0.0057 | 0.0161 | 0.0077 |
| 4000 | 0.0148 | 0.0038 | 0.0121 | 0.0057 |

**4. ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ Asynchronous motor (Induction motor)**

มอเตอร์อซิงโครนัสจะจ่ายกระแสลัดวงจรไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล (Three-phase Balanced Short Circuit) กระแสลัดวงจรของมอเตอร์อซิงโครนัสจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ในกรณีที่มอเตอร์อซิงโครนัส หรือ กลุ่มของมอเตอร์อซิงโครนัส มีกระแสพิกัดรวมน้อยกว่า 1% ของกระสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น  เราอาจจะไม่ต้องคิดถึงผลของมอเตอร์อซิงโครนัสก็ได้

ดังนั้นผลของมอเตอร์อซิงโครนัสสามารถตัดทิ้งได้

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.9) |

เมื่อ  = ผลรวมของกระแสพิกัดมอเตอร์ในบริเวณที่เกิดการลัดวงจร

I”k = กระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งวงจรโดยไม่มีผลต่อมอเตอร์

ส่วนในกรณีที่จะต้องคิดกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ ค่าอิมพีแดนซ์ ZM = RM + jXM ของมอเตอร์ สามารถคำนวณได้จาก

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.10) |

เมื่อ UrM = แรงดันพิกัดของมอเตอร์

IrM = กระแสพิกัดของมอเตอร์

SrM = กำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์

ILM/IrM = อัตราส่วนของกระแสล็อกโรเตอร์ต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ RM/XM ให้ใช้ค่านี้

RM/XM  = 0.01, XM = 0.995 ZM สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว  1 MW

RM/XM  = 0.15, XM = 0.989 ZM สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว < 1 MW

RM/XM  = 0.42, XM = 0.922 ZM สำหรับกลุ่มมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลาย ๆ ตัวที่ต่อเป็นบัสเดียวกันอาจรวมกันเป็นกลุ่มมอเตอร์ได้ ถ้าพิกัดกลุ่มมอเตอร์มีค่าเป็น kW หรือ MW ก็สามารถคำนวณหากำลังปรากฏ SrM ได้โดยกำหนดให้ ตัวประกอบกำลัง และ ประสิทธิภาพ 

**5.1.2 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร**

**5.1.2.1 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three-phase Short Circuit)**

โดยทั่วไปการลัดวงจรแบบนี้จะให้กระแสลัดวงจรสูงสุด และสามารถคำนวณได้ง่ายเพราะว่าจะเกี่ยวข้องเฉพาะอิมพีแดนซ์ซีเควนส์บวก (Positive Sequence Impedance) เท่านั้น **กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I”k**

จากภาพที่ 5.2 กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I”k สามารถหาได้จาก

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.11) |

เมื่อ  = แหล่งจ่ายไฟสมมูล

Rk = ผลรวมของความต้านทานที่ต่ออนุกรม

Xk = ผลรวมของรีแอกแตนซ์ที่อนุกรม

Zk = อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ในกรณีของการลัดวงจรวงไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้ว่า

Ik = Ib = I”k

**กระแสลัดวงจรค่ายอด iP**

เนื่องจากกระแสลัดวงจรมาจากวงจรที่ต่ออนุกรม ดังนั้นกระแสลัดวงจรค่ายอดจึงหาได้จาก

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.12) |

โดยที่ ค่าจะขึ้นอยู่กับค่า R/X หรือ X/R อาจคำนวณค่าได้โดยประมาณจาก



นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าได้จากภาพที่ 5.4



(ก) (ข)

**ภาพที่ 5.4** ค่าจะขึ้นอยู่กับค่า R/X หรือ X/R

**5.1.2.2 การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน (Line to Line Short Circuit Without Earth Connection)**

**กระแสตัดวงจรเริ่มต้น I”k2**

ด้วยแรงดันสมมูลเท่ากับ กระแสลัดวงจรเริ่มต้นสามารถคำนวณได้ ดังนี้

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.13) |
| ถ้า |  |

อัตราส่วนของ I”k2 กับ I”k หาได้คือ

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.14) |

กระแสลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน ของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

**กระแสลัดวงจรค่ายอด I”p2**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.15) |

ใช้คำนวณหากระแสลัดวงจรต่ำสุด (Minimum Fault Current ; Imin)

**5.1.2.3 การลัดวงจรแบบสายถึงดิน (Line to Earth Short Circuit)**

การลัดวงจรแบบสายถึงดิน เป็นการลัดวงจรที่เกิดบ่อยที่สุด สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ที่ต่อลงดิน การลัดวงจรแบบนี้จะเกิดระหว่างสายเฟส (สายมีไฟ สาย Hot) กับ สายนิวทรัล (Neutral) หรือสายดิน (Ground) และสำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย (ไฟฟ้าแรงดัน 220 V, 230 V หรือ 240 V) การลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นแบบสายถึงดิน

**กระแสตัดวงจรเริ่มต้น I”k1**

ด้วยแรงดันสมมูลเท่ากับ กระแสลัดวงจรเริ่มต้นสามารถคำนวณได้ ดังนี้

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.16) |
| ถ้า |  |

**กระแสลัดวงจรค่ายอด I”p1**

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.17) |

**ตัวอย่างที่ 5.1** จากระบบดังภาพที่ 5.5 มีข้อมูลดังนี้

- ระบบไฟฟ้า S”kQ = 500 MVA, UnQ = 22 kV

- หม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV/400 V, SrT = 1000 kVA, ukr = 6%, PkrT = 13.5 kW

- สายไฟฟ้า PVC 3 x 35 sqmm. ยาว 25 ม.

RL = 0.529 m/m., XL = 0.103 m/m., R(0)L/RL = 4, X(0)L/XL = 3

จงหากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 และ F**2**

ให้ c = 1.00, KT = 1.00



**ภาพที่ 5.5** อิมพีแดนซ์ไดอะแกรมประกอบตัวอย่างที่ 5.1

**วิธีทำ**

ที่ตำแหน่ง F1

หา Z1

**ระบบไฟฟ้า**





****

= 0.352 m

XQt = 0.995ZQt = 0.350 m

RQt  = 0.1XQt = 0.035 m

**หม้อแปลง**

1,000 kVA, 22 kV/400 V, % U = 6, PL = 13.5 kW





= 9.60 m

****

****

= 2.16 m

****

****

= 9.35 m

**การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล**

**ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1**



**ภาพที่ 5.6** จุดลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1

ZT = 2.16 + j 9.35 m

Zk = ZQt + ZT

= (0.035 + j0.35) + (2.16+ j9.35)

= 2.195 + j9.70 m

** =** 9.95 m ค่า R/X = 0.23 จะได้ว่า = 1.52





= 23.2 kA





= 49.9 kV

**การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน**





= 20.1 kV

**การลัดวงจรแบบสายถึงดิน**

หา Z(0)

**ระบบไฟฟ้า**

ไม่ต้องคิด Z(0) เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบเดลตา-วาย

**หม้อแปลงไฟฟ้า**

Z(0)T = R(0)T + jX(0)T

R(0)T = RT = 2.16 m

X(0)T = 0.95XT = 0.95 x 0.93

= 8.88 m







= 23.9 kA

การลัดวงจรแบบสายถึงดินที่ขั้วหม้อแปลง กระแสลัดวงจรอาจมีค่าสูงกว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลได้

**การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล**

**ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2**



**ภาพที่ 5.7** จุดลัดวงจรที่ตำแหน่ง F2

ZL1 = 25 x (0.529 + j0.103)

= 13.23 + j2.58 m

Zk = (ZQt + Zt) + ZL

= (2.195 + j9.70) + (13.23 + j2.58)

= 15.34 + j12.28 m

**=** 19.72 m ค่า R/X = 1.26 จะได้ว่า = 1.04





= 11.7 kA





= 17.2 kV

**การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน**





= 10.1 kV

**การลัดวงจรแบบสายถึงดิน**

การลัดวงจรให้คิดลัดวงจรผ่านสายศูนย์

หา Z(0)

**สายเคเบิล**

ไม่ต้องคิด Z(0) เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบเดลตา-วาย

หม้อแปลงไฟฟ้า

ให้ 

R(0)L = 4 x 13.23 = 52.92 m

X(0)L = 3 x 2.58 = 7.74 m

Z(0)L = (2.16 + 52.92) + (j 8.88 + j 7.74)

= 55.08 + j16.62 m







= 7.3 kA

การลัดวงจรแบบสายถึงดินที่ไกลจากหม้อแปลงไฟฟ้า กระแสลัดวงจรจะน้อยกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลเสมอ เนื่องจากทางกลับของกระแสจะมี Z(0) มาก

**ตัวอย่างที่ 5.2**  จากตัวอย่างที่ 5.1 ถ้าระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Infinite Bus จงหาค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่ง F1

**วิธีทำ**

ตำแหน่ง F1

ระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Infinite Bus

ZQt = 0

ZT = 2.16 + j 9.35 m





= 24.1 kA

**หมายเหตุ**

ถ้าระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Infinite Bus กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ขั้วแรงต่ำของหม้อแปลง สามารถหาได้จากสมการ



โดยที่ Uk = % อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

ln = กระแสพิกัดของหม้อแปลง (A)

จากตัวอย่าง





= 24.1 kA

**วิธีการสอนและกิจกรรม**

1. ผู้สอนบรรยายเนื้อหา
2. นักศึกษาร่วมอภิปราย
3. ผู้สอนตั้งคำถามให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมในการเรียน
4. นักศึกษาทำแบบฝึกหัด
5. ให้งานที่มอบหมาย

**สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน**

1. หนังสือ

* วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556.** กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2556.
* ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. **การออกแบบระบบไฟฟ้า.** กรุงเทพฯ : โชติอนันต์ ครีเอชั่น, 2556.
* ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. **คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า.** กรุงเทพฯ : สมารัท ดิจิทัล โซลูชั่น, 2556.
* นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ. **เอกสารคำสอน รายวิชา 04-112-313 การออกแบบระบบไฟฟ้า.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2559.

1. โสตทัศนวัสดุ

* กระดาน
* เครื่องฉายและคอมพิวเตอร์

**งานที่มอบหมาย**

* 1. ทำแบบฝึกหัดท้ายบทเรียน
  2. ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมจากหนังสือที่เกี่ยวกับการคำนวณกระแสลัดวงจร

**การวัดผล**

1. พิจารณาการเข้าชั้นเรียนตามเวลากำหนด สนใจเรียนและเข้าร่วมกิจกรรมการเรียน
2. ตรวจแบบฝึกหัด การซักถาม-ตอบ

**แบบฝึกหัด**

* 1. กระแสลัดวงจรเป็นผลมาจากกระแสส่วนใด
  2. การลัดวงจรไฟฟ้ามีผลอย่างไรต่อบริภัณฑ์และระบบไฟฟ้า
  3. จงอธิบายอิมพีแดนซ์ลัดวงจรอาจแบ่งออกเป็นกี่ส่วน
  4. มาตรฐาน IEC 60909 คือมาตรฐานเกี่ยวกับอะไร และมีหลักการอย่างไร
  5. จงอธิบายความหมายของ I”k ตามมาตรฐาน IEC 60909 นั้น
  6. จงอธิบายการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล
  7. จงอธิบายการลัดวงจรแบบสายถึงดิน
  8. ระบบไฟฟ้า S”kQ = 500 MVA, UnQ = 22 kV หม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV/230 - 400 V

SrT = 3150 kVA, ukr = 8%, PkrT = 40 kW จงคำนวณกระแสลัดวงจร