ภาคผนวก ฌ.
วิธีการหาขนาดสายดินของวงจรย่อย

วิธีการหาขนาดสายดินของวงจรย่อยจะใช้หลักการการหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจรย่อยที่พิจารณา ถ้าค่า Earth fault loop impedance ของวงจรย่อยอยู่ในเกณฑ์ที่ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรย่อยนั้นทำงานภายในเวลาที่กำหนดก็แสดงว่าขนาดสายดินของวงจรย่อยมีความเหมาะสม

ค่า Earth fault loop impedance คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงจำหน่ายและสายเฟสไปถึง ณ จุดที่เกิดฟอลต์ รวมทั้งอิมพีแดนซ์ของสายดินที่กระแสฟอลต์ไหลกลับมาที่หม้อแปลง

ค่า Maximum earth fault loop impedance คือ ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ยังคงทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานได้ภายในเวลาที่กำหนด

ค่า Earth fault loop impedance ของวงจรมีความสำคัญในการเลือกขนาดของสาย-ดิน เพื่อให้การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันทำงานตามเวลาที่กำหนดคือ 0.1 วินาที ถึง 5 วินาที โดยที่กระแสทำงานเป็น 4.5 เท่าของขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์ ตามมาตรฐาน IEC 60947-2 (Type B), กระแสทำงานเป็น 5 เท่าของขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์ ตามมาตรฐาน IEC 60898 (Type B) และ กระแสทำงานเป็น 10 เท่าของขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์ ตามมาตรฐาน IEC 60898 และ IEC 60947-2 (Type C)

ฌ.1 วิธีการหา Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขนาด

ในการพิจารณาขนาดของสายดินจำเป็นที่จะต้องหาค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขนาด จากนั้นก็จะทำการหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจรที่มีการพิจารณาขนาดสายดิน สำหรับสมการในการหาค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขนาดเป็นดังนี้

$$Zs = Uo/Ia$$

โดยที่ Zs คือ Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์
Uo คือ แรงดันของวงจรที่หม้อแปลงจำหน่าย
Ia คือ กระแสทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายในเวลาที่กำหนด (0.1 วินาที - 5 วินาที)

ค่าของ Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ ฌ.1 ถึง ตารางที่ ฌ.4

ตารางที่ ฌ.1 แสดงค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์
(IEC 60898 Type B)

ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	กระแสทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (โอห์ม)
10	50	4.600
15	75	3.067
20	100	2.300
30	150	1.533
40	200	1.150
50	250	0.920
60	300	0.767
70	350	0.657

ตารางที่ ฌ.2 แสดงค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์
(IEC 60898 Type C)

ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	กระแสทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (โอห์ม)
10	100	2.300
15	150	1.533
20	200	1.150
30	300	0.767
40	400	0.575
50	500	0.460
60	600	0.383
70	700	0.329

ตารางที่ ฌ.3 แสดงค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (IEC 60947-2 Type B)

ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	กระแสทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (โอห์ม)
10	45	5.111
15	67.5	3.407
20	90	2.556
30	135	1.704
40	180	1.278
50	225	1.022
60	270	0.852
70	315	0.730

ตารางที่ ฌ.4 แสดงค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (IEC 60947-2 Type C)

ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	กระแสทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (แอมแปร์)	Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (โอห์ม)
10	100	2.300
15	150	1.533
20	200	1.150
30	300	0.767
40	400	0.575
50	500	0.460
60	600	0.383
70	700	0.329

ฌ.2 วิธีการหา Earth fault loop impedance ของวงจร

การหา Earth fault loop impedance ของวงจรสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขนาดนั้น เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิต-เบรกเกอร์ ซึ่งค่าดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ ฌ.1 ถึง ตารางที่ ฌ.4 ในกรณีที่ค่า Earth fault loop impedance ของวงจรสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์น้อยกว่าค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แสดงว่าการเลือกขนาดของสาย-ดินมีความเหมาะสม

แบบจำลองในการหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจรสำหรับเซอร์กิตเบรก-เกอร์แต่ละขนาดจะมีการพิจารณาอิมพีแดนซ์รวมของสายลำดับที่ ฌ.2.1 ถึง ฌ.2.4 ตามแบบจำลองดังนี้

ฌ.2.1 อิมพีแดนซ์ของสายจำหน่ายแรงต่ำ (คิดความยาวสายตั้งแต่ 100-1000 เมตร)

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการหา Earth fault loop impedance ของสายจำหน่ายแรงต่ำมีดังนี้

สายอะลูมิเนียม 50 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.616+j0.379 โอห์ม/ก.ม.
สายอะลูมิเนียม 95 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.328+j0.356 โอห์ม/ก.ม.
สายอะลูมิเนียม 120 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.256+j0.349 โอห์ม/ก.ม.
สายอะลูมิเนียม 185 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.169+j0.334 โอห์ม/ก.ม.

ฌ.2.2 อิมพีแดนซ์ของสายเข้ามิเตอร์ (คิดความยาวสายคงที่คือ 6 เมตร)

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการหา Earth fault loop impedance ของสายเข้ามิเตอร์มีดังนี้

สายทองแดง 6 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 3.316+j0.325 โอห์ม/ก.ม.
สายทองแดง 10 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 1.970+j0.309 โอห์ม/ก.ม.
สายทองแดง 35 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.565+j0.266 โอห์ม/ก.ม.

ฌ.2.3 อิมพีแดนซ์ของสายออกจากมิเตอร์ (คิดความยาวสายคงที่คือ 25 เมตร)

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการหา Earth fault loop impedance ของสายออกจากมิเตอร์มีดังนี้

สายทองแดง 4 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 4.963+j0.341 โอห์ม/ก.ม.
สายทองแดง 10 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 1.970+j0.309 โอห์ม/ก.ม.
สายทองแดง 35 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.565+j0.266 โอห์ม/ก.ม.

ฌ.2.4 อิมพีแดนซ์ของสายวงจรย่อย (คิดความยาวสายคงที่คือ 30 เมตร)

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการหา Earth fault loop impedance ของสายวงจรย่อยมีดังนี้

สายทองแดง 1.5 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 13.027+j0.149 โอห์ม/ก.ม.

สายทองแดง 2.5 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 7.978+j0.138 โอห์ม/ก.ม.

สายทองแดง 4 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 4.963+j0.134 โอห์ม/ก.ม.

สายทองแดง 6 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 3.316+j0.128 โอห์ม/ก.ม.

สายทองแดง 10 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 1.970+j0.125 โอห์ม/ก.ม.

สายทองแดง 16 ตร.มม. ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 1.238+j0.119 โอห์ม/ก.ม.

สำหรับแบบจำลองในการพิจารณาหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ทราบค่าความต้านทานของสาย (คิดที่อุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียส) และรีแอกแตนซ์ของสาย สามารถที่จะหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจรได้ ซึ่งจะยกตัวอย่างในการหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 15 A ที่ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ 100 เมตร

ชนิดสาย	ขนาดสาย (ตร.มม)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม/ก.ม.)	ความยาว (ก.ม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
สายจำหน่ายแรงต่ำ (AL)	50	0.616+j0.379	2x0.100[1)]	0.144650890
สายเข้ามิเตอร์ (CU)	6	3.316+j0.325	2x0.006[1)]	0.039982662
สายออกจากมิเตอร์ (CU)	4	4.963+j0.341	2x0.0251[1)]	0.248735050
สายเฟสวงจรย่อย (CU)	2.5	7.978+j0.138	1x0.030[2)]	0.239375803
สายดินวงจรย่อย (CU)	1.5	13.027+j0.149	1x0.030[2)]	0.390835563
ค่า Earth fault loop impedance ของวงจร				1.063579968

หมายเหตุ 1) คิดระยะสายเฟสและนิวทรัล

2) คิดระยะเฉพาะสายเฟสหรือสายดิน

ค่าของ Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละขนาดได้แสดงไว้ในตารางที่ ฌ.6 ถึง ตารางที่ ฌ.11 ซึ่งในหมายเหตุจะระบุค่า Zs(critical) เพื่อตรวจสอบว่าขนาดของสายดินมีความเหมาะสมหรือไม่ สำหรับขนาดสายเมนและความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำแตกต่างกัน

ในการพิจารณาว่าค่า Earth fault loop impedance ของวงจรว่ามีค่าน้อยเพียงพอที่จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานนั้น จะพิจารณาเฉพาะเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่มีการใช้งานกันมาก คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ Type C ซึ่งค่า Maximum earth fault loop impedance ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ Type C มีค่าต่ำกว่าของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ Type B ถ้าในกรณีที่ค่า Earth fault loop impedance ของวงจรทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ Type C ทำงานได้แสดงว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ Type B ก็จะทำงานได้เสมอเช่นกัน

ตารางที่ ณ.6 แสดงค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 15 A

ขนาดสายจำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm) ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	1.0636	1.2052	1.3529	1.4975	1.6422	1.7868	1.9315	2.0761	2.2208	2.3654
95	1.0157	1.1126	1.2094	1.3062	1.4030	1.4998	1.5966	1.6934	1.7902	1.8871
120	1.0055	1.0921	1.1786	1.2652	1.3518	1.4383	1.5249	1.6114	1.6980	1.7846
185	0.9936	1.0687	1.1435	1.2184	1.2933	1.3681	1.4430	1.5178	1.5927	1.6676

หมายเหตุ Zs(critical) = 1.533 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 6 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 4 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 2.5 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 1.5 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ตารางที่ ณ.7 แสดงค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 20 A

ขนาดสายจำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm) ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	0.6558	0.8004	0.9451	1.0897	1.2344	1.3790	1.5237	1.6684	1.8130	1.9577
95	0.6080	0.7048	0.8016	0.8984	0.9952	1.0920	1.1888	1.2856	1.3825	1.4793
120	0.5977	0.6843	0.7708	0.8574	0.9440	1.0305	1.1171	1.2037	1.2902	1.3768
185	0.5860	0.6609	0.7357	0.8106	0.8850	0.9603	1.0352	1.1101	1.1849	1.2598

หมายเหตุ Zs(critical) = 1.150 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 10 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 10 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 4 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 2.5 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ตารางที่ ฌ.8 แสดงค่า Earth fault loop impedance **ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์** 30 A

ขนาดสาย จำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm) ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	0.5160	0.6606	0.8053	0.9499	1.0946	1.2392	1.3839	1.5285	1.6732	1.8178
95	0.4681	0.5649	0.6618	0.7586	0.8554	0.9522	1.0490	1.1458	1.2426	1.3395
120	0.4579	0.5445	0.6310	0.7176	0.8041	0.8907	0.9773	1.0638	1.1504	1.2370
185	0.4462	0.5211	0.5959	0.6708	0.7456	0.8205	0.8954	0.9702	1.0451	1.1200

หมายเหตุ Zs(critical) = 0.767 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 10 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 10 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 6 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 4 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ตารางที่ ฌ.9 แสดงค่า Earth fault loop impedance **ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์** 40 A

ขนาดสาย จำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm) ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	0.3915	0.5362	0.6808	0.8255	1.9701	1.1148	1.2594	1.4041	1.5487	1.6934
95	0.3437	0.4405	0.5373	0.6341	0.7309	0.8278	0.9246	1.0214	1.1182	1.2150
120	0.3334	0.4200	0.5066	0.5931	0.6797	0.7663	0.8528	1.9394	1.0260	1.1125
185	0.3217	0.3966	0.4715	0.5463	0.6212	0.6961	0.7709	0.8458	0.9207	0.9955

หมายเหตุ Zs(critical) = 0.575 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 10 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 4 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ตารางที่ ณ.10 แสดงค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 50 A

ขนาดสายจำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm)									
	ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	0.3202	0.4649	0.6095	0.7542	0.8988	1.0435	1.1881	1.3328	1.4774	1.6221
95	0.2724	0.3692	0.4660	0.5628	0.6596	0.7565	0.8533	0.9501	1.0469	1.1437
120	0.2621	0.3487	0.4353	0.5218	0.6084	0.6950	0.7815	0.8681	0.9547	1.0412
185	0.2504	0.3253	0.4002	0.4750	0.5499	0.6248	0.6996	0.7745	0.8494	0.9242

หมายเหตุ Zs(critical) = 0.460 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 16 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 6 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ตารางที่ ณ.11 แสดงค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 60 A

ขนาดสายจำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm)									
	ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	0.3202	0.4649	0.6095	0.7542	0.8988	1.0435	1.1881	1.3328	1.4774	1.6221
95	0.2724	0.3692	0.4660	0.5628	0.6596	0.7565	0.8533	0.9501	1.0469	1.1437
120	0.2621	0.3487	0.4353	0.5218	0.6084	0.6950	0.7815	0.8681	0.9547	1.0412
185	0.2504	0.3253	0.4002	0.4750	0.5499	0.6248	0.6996	0.7745	0.8494	0.9242

หมายเหตุ Zs(critical) = 0.383 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 16 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 6 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ตารางที่ ฌ.12 แสดงค่า Earth fault loop impedance ของวงจร ในกรณีที่ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ 70 A

ขนาดสาย จำหน่ายแรงต่ำ (ตร.มม.)	ค่า Earth fault loop impedance (Ohm)									
	ความยาวสายจำหน่ายแรงต่ำ (เมตร)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
50	0.3202	0.4649	0.6095	0.7542	0.8988	1.0435	1.1881	1.3328	1.4774	1.6221
95	0.2724	0.3692	0.4660	0.5628	0.6596	0.7565	0.8533	0.9501	1.0469	1.1437
120	0.2621	0.3487	0.4353	0.5218	0.6084	0.6950	0.7815	0.8681	0.9547	1.0412
185	0.2504	0.3253	0.4002	0.4750	0.5499	0.6248	0.6996	0.7745	0.8494	0.9242

หมายเหตุ Zs(critical) = 0.329 โอห์ม

สายเข้ามิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 6 เมตร, สายออกจากมิเตอร์ขนาด 35 ตร.มม ยาว 25 เมตร, สายเฟสวงจรย่อยขนาด 16 ตร.มม และสายดินวงจรย่อยขนาด 6 ตร.มม ยาว 30 เมตร

ค่า Earth fault loop impedance ของวงจรในตารางที่ ฌ.6 ถึง ตารางที่ ฌ.12 ถ้าอยู่ในบริเวณที่แรเงาก็ให้ใช้ขนาดของสายดินตามตารางที่ 4-2 แต่ถ้าหากว่าอยู่นอกบริเวณที่แรเงา ให้ใช้ **"ขนาดของสายดินเท่ากับขนาดของสายเฟส"**