

การต่อลงดินในระบบแรงต่ำ

มาตรฐานการต่อลงดินของ IEC เรียกการต่อลงดินว่า “ Earthing ” เป็นการต่อระหว่างดินและวัสดุที่นำไฟฟ้า โดยส่วนที่นำไฟฟ้าของตัวติดตั้งอยู่ภายใต้สภาวะปกติที่ไม่มีแรงดันหรือประจุ

การต่อลงดิน (Earthing) มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ คือ ความปลอดภัย (Safety) การป้องกัน (Protection) และหน้าที่ (function)

safety มีความสัมพันธ์กับคน โดยการควบคุมระดับแรงดันและระยะเวลาในการเกิด Fault

Protection มีความสัมพันธ์กับอาคารสิ่งก่อสร้าง ต้นไม้และอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยจำกัดแรงดัน ซึ่งที่สำคัญคือต้องแน่ใจว่ากระแสผิดพลาด (fault current) เกิดขึ้นในระยะเวลาที่มีกริยาการป้องกัน

Function สัมพันธ์กับความถูกต้องและแม่นยำในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์ โดยจัดบัสอ้างอิง (reference bus) ที่คงที่และไม่มีสัญญาณรบกวน

ในระบบแรงต่ำตามหลักการทางทฤษฎีสามารถทำการต่อลงดิน ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

1. Effectively grounded การต่อลงดินแบบยังผล มีลักษณะที่ต่อเนื่อง มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ และสามารถทนต่อกระแสค่าสูงได้
2. Ungrounded ไม่ต่อลงดิน
3. Resistance grounded การต่อลงดินผ่านความต้านทาน
4. Reactance grounded การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์

การต่อลงดินแบบผ่านความต้านทานและผ่านรีแอกแตนซ์นั้นจะไม่นิยมใช้ เพราะว่าค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์จำเป็นต้องมีค่าต่ำเพียงพอที่ให้กระแสฟลลท์สูงไหลผ่าน ดังนั้นระบบการต่อลงที่คืนั้นควรจะมีค่าความต้านทานหรือค่ารีแอกแตนซ์เป็นศูนย์ ดังเช่นระบบการต่อลงดินแบบยังผล ซึ่งเป็นการต่อระบบลงดินที่ให้ค่ากราวด์มีค่าใกล้เคียงกว่าการต่อลงดินแบบผ่านความต้านทานและผ่านรีแอกแตนซ์ ดังนั้นในบทความนี้จะถึงพิจารณาการต่อลงดินแบบยังผลอย่างเดียว

ชนิดของการต่อลงดิน (Type of Earthing System)

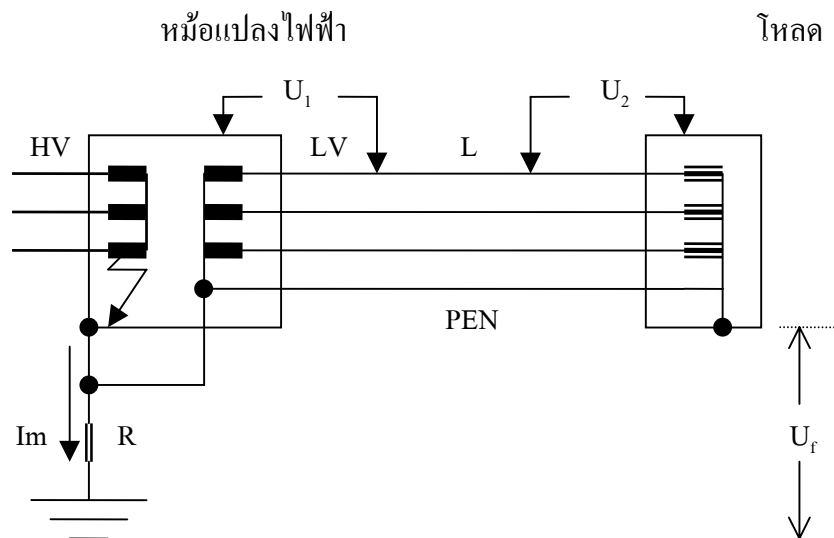
เพื่อให้เข้าใจการเรียกชื่อระบบการต่อลงดินได้ถูกต้องและมีระบบ จึงกำหนดวิธีเรียกระบบไฟฟ้าตามวิธีการต่อลงดิน

วิธีเรียกชื่อนี้ กำหนดด้วยตัวอักษร 3 หรือ 4 ตัว ดังนี้ คือ

	1	2	3	4
ตัวอักษรตัวแรก	- บอกถึงการจัดการต่อลงดินของแหล่งจ่ายไฟฟ้า			
“ T “	แสดงว่า	จุดหนึ่งมากกว่าของแหล่งจ่ายไฟต่อลงดินโดยตรง		
“ I “	“	แหล่งจ่ายไฟไม่ได้ต่อลงดิน หรือ ต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์จำกัดกระแส		
ตัวอักษรตัวที่ 2	- บอกถึงการจัดการต่อลงดินของแหล่งจ่ายไฟฟ้า			
“ T “	แสดงว่า	ส่วนที่เป็นโลหะเปลือยทั้งหมดต่อลงดินโดยตรง		
“ N “	“	ส่วนที่เป็นโลหะเปลือยทั้งหมดต่อเข้ากับสายดิน		
อักษรตัวที่ 3 และ 4	- แสดงการจัดการของสายดิน			
“ S “	สายนิวทรัลและสายดินแยกจากกัน			
“ C “	สายนิวทรัลและสายดินรวมเป็นเส้นเดียวกัน			

1. **TN - C system** เป็นระบบการต่อลงดินในลักษณะสายนิวทรัล(N)และสายดิน(PE)ต่อรวมกันเป็นสายเดียวเรียกว่าสายPEN ตลอดทั้งระบบระหว่างโหนดกับหม้อแปลงไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 364-4-442/1993 มีการต่อลงดินที่ตัวหม้อแปลงออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

1.1. การต่อลงดินของหม้อแปลงทางด้านแรงต่ำต่อรวมกับตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า

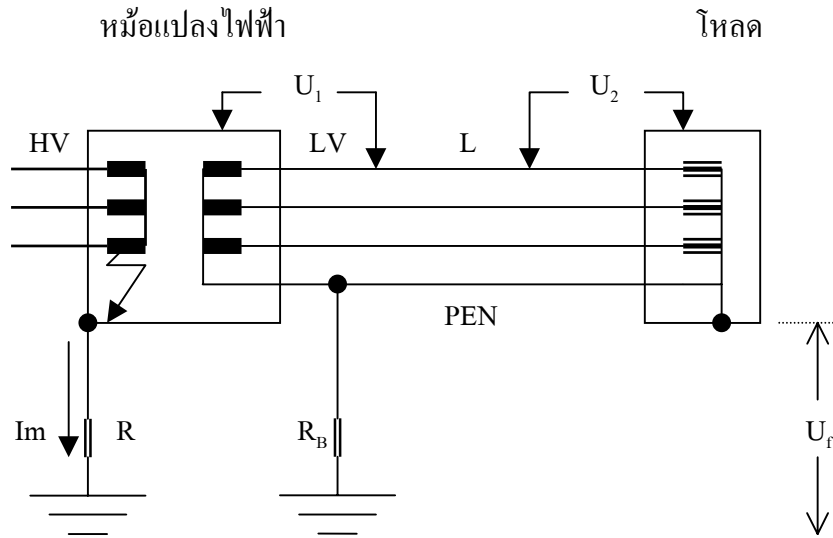


กรณีเกิด Fault ทางด้านแรงสูง

$$U_2 = U_1 = U_0$$

$$U_f = R \times I_m$$

1.2. การต่อลงดินของหม้อแปลงทางด้านแรงต่ำต่อแยกกับตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการต่อในลักษณะนี้เป็นการต่อใช้งานในระบบจำหน่ายของ กฟภ.



กรณีเกิด Fault ทางด้านแรงสูง

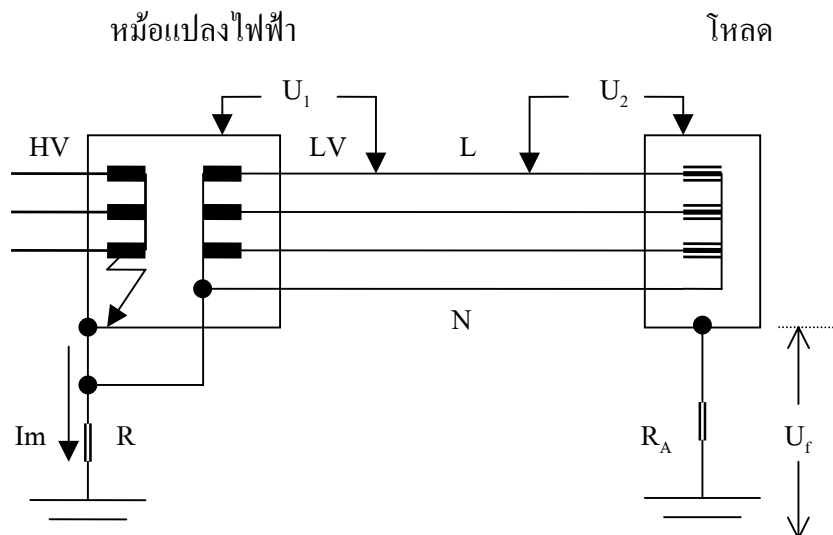
$$U_1 = R \times I_m + U_0$$

$$U_2 = U_0$$

$$U_f = 0$$

2. **TT system** เป็นระบบการต่อลงดินในลักษณะสายนิวตรอน(N)ของหม้อแปลงและสายดิน (PE)ของโหลดมีการต่อแยกกัน ตามมาตรฐาน IEC 364-4-442/1993 มีการต่อลงดินที่ตัวหม้อแปลงออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

1.1. การต่อลงดินของหม้อแปลงทางด้านแรงต่ำต่อรวมกับตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า



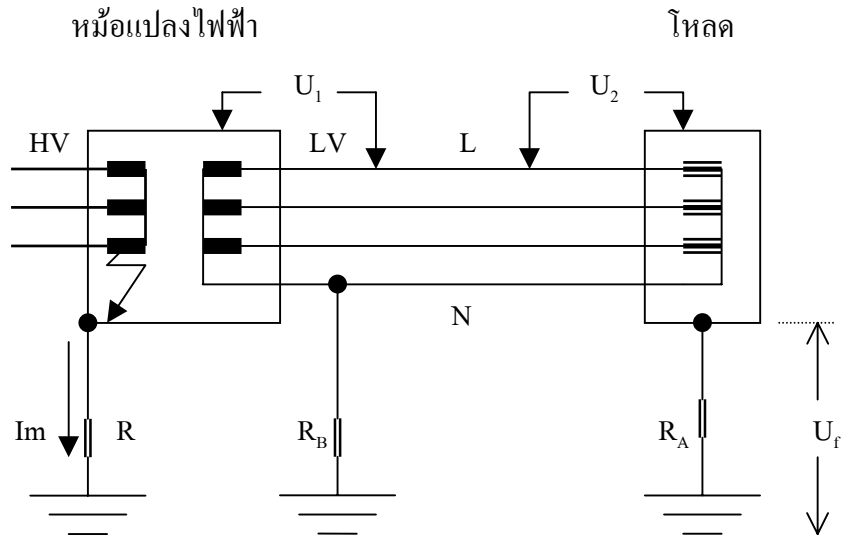
กรณีเกิด Fault ทางด้านแรงสูง

$$U_1 = U_0$$

$$U_2 = R \times I_m + U_0$$

$$U_f = 0$$

1.2. การต่อลงดินของหม้อแปลงทางด้านแรงต่ำต่อแยกกับตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการต่อในลักษณะนี้เป็นการต่อใช้งานในระบบจำหน่ายของ กฟภ.



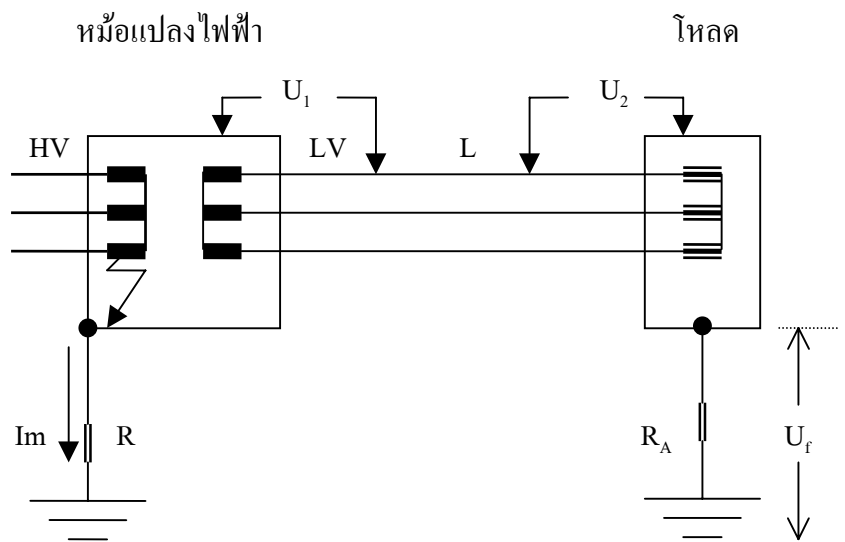
กรณีเกิด Fault ทางด้านแรงสูง

$$U_1 = R \times I_m + U_0$$

$$U_2 = U_0$$

$$U_f = 0$$

3. IT system เป็นระบบไม่มีการต่อลงดินด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการต่อลงดินของระบบจะต่อตรงส่วนเปลือกโครงที่เป็นโลหะของโหลดเท่านั้น



กรณีเกิด Fault ทางด้านแรงสูง

$$U_1 = R \times I_m + U_0$$

$$U_2 = U_0$$

$$U_f = 0$$

กรณีเกิด fault ทางด้านแรงต่ำ

ค่า Zero – sequence impedance ที่ไม่พิจารณาสาย PEN : Z_C

$$Z_C = r_C + r_e + j0.4340 \times \log_{10} \frac{D_e}{GMR_{3C}}$$

r_C = a – c resistance of one conductor , $\Omega - km$

r_e = a – c resistance of earth return (Carson's formulas approximately $0.148 \Omega - km$)

D_e = distance to equivalent earth part (Carson's formulas approximately 1024 m at $\rho = 100 \Omega - m$)

GMR_{3C} = geometric mean radius of three conductors , m

$$= \sqrt[3]{(GMR_{1C})(GMD_{3C})^2} \text{ for round conductors}$$

GMR_{1C} = geometric mean radius of individual conductors , m

$$= C \times \frac{d}{2}$$

C = constant depending on number of strands in conductor

d = conductor diameter , m

GMD_{3C} = self - geometric mean radius of three conductors , m

$$= \sqrt[3]{S_{ab} \times S_{bc} \times S_{ca}}$$

S = distance between the conductor , m

Zero – sequence impedance ของสาย PEN : Z_{PEN}

$$Z_{PEN} = r_e + 3 \times r_{PEN} + j0.4340 \times \log_{10} \frac{D_e}{GMR_{PEN}}$$

r_C = a – c resistance of PEN conductor , $\Omega - km$

GMR_{PEN} = geometric mean radius of individual conductors , m

$$= C \times \frac{d}{2}$$

The mutual component impedance : Z_m

$$Z_m = r_e + j0.4340 \times \log_{10} \frac{D_e}{GMD_{PEN}}$$

$$GMD_{PEN} = \text{self - geometric mean radius of three conductors, m}$$

$$= \sqrt[3]{S_{aPEN} \times S_{bPEN} \times S_{cPEN}}$$

S = distance between the conductor, m

กรณีกระแสไหลกลับในส่วนของสาย PEN โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่า earth resistivity

$$Z_O = Z_C + Z_{PEN} - 2Z_m$$

กรณีกระแสไหลกลับลงดิน และมีค่าขึ้นอยู่กับค่า earth resistivity

$$Z_O = Z_C$$

กรณีกระแสไหลกลับอาจมีการแบ่งไหลระหว่างจุดลงกราวด์และสาย PEN

$$Z_O = (Z_C - Z_m) + \frac{(Z_{PEN} - Z_m)Z_m}{Z_{PEN}}$$

Positive sequence impedance $Z_+ = (Z_C - Z_m)$

Transformer impedance $Z_T = R_T + jX_T$

Short – circuit impedance $U_k = \sqrt{(U_r)^2 + (U_x)^2}$

$$U_r \cong 1\%$$

$$R_T = \frac{U_r}{100} \times Z_{base}$$

$$X_T = \frac{U_x}{100} \times Z_{base}$$

$$Z_{base} = \frac{V^2}{KVA_T}$$

Positive sequence resistance : $Z_{+r} = R_T = Z_{-r}$: Negative sequence resistance

Positive sequence reactance : $Z_{+x} = X_T = Z_{-x}$: Negative sequence reactance

Zero sequence resistance : $Z_{0r} = R_T$

Zero sequence reactance : $Z_{0x} = 0.95 \times X_T$

The winding Delta/Star connected $Z_{P+} = Z_{P-}$

The total positive – phase impedance : $Z_{P+} = Z_{+r} + Z_{+x} + Z_+$

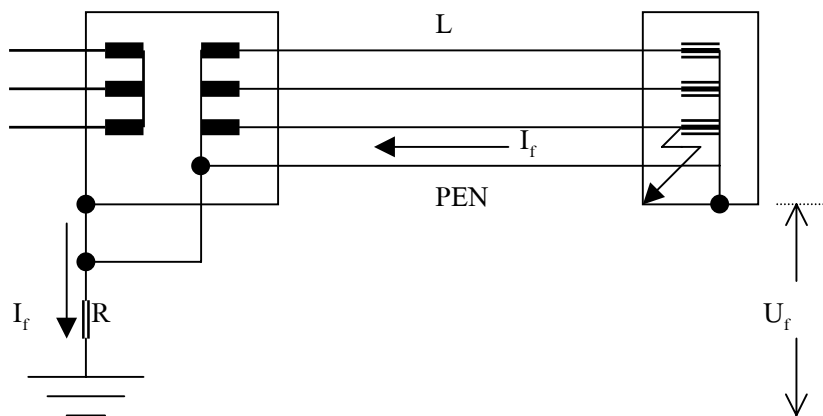
The total positive – phase impedance : $Z_{P0} = Z_{0r} + Z_{0x} + Z_0$

กระแส earth – fault ในระบบ TN

กระแส earth – fault จะไหลลงดินผ่านสาย PEN เท่านั้น

ตามสมการ
$$I_f = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L}{Z_{P+} + Z_{P-} + Z_{P0}}$$
 จากรูปที่ 1.

จากสมการข้างบน asumed ค่า resistance จุดที่เกิด fault มีค่าเป็นศูนย์ และ asumed ค่า resistance ที่แท่งกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ (ค่า resistance ของแท่งกราวด์มีผลต่อการเพิ่มค่า Zero sequence reactance)



กระแส earth – fault ในระบบ TT

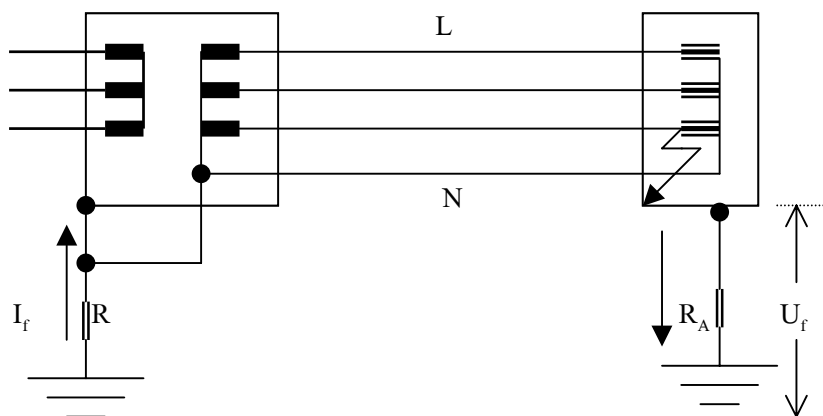
กระแส earth – fault จะไหลลงดินเท่านั้น

$$I_f = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L}{Z_{P+} + Z_{P-} + Z_{P0}}$$

จากสมการเป็นการ asumed ค่า resistance จุดที่เกิด fault และ asumed ค่า resistance ที่แท่งกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับกับระบบ TN-C

ในทางปฏิบัติในระบบ TT จะพิจารณา ค่ากระแส earth – fault ต่ำสุดในระบบตามค่า

Resistance ที่แท่งกราวด์เท่านั้น ตามสมการ
$$I_f = \frac{V_P}{R + R_A}$$
 จากรูปที่ 2.



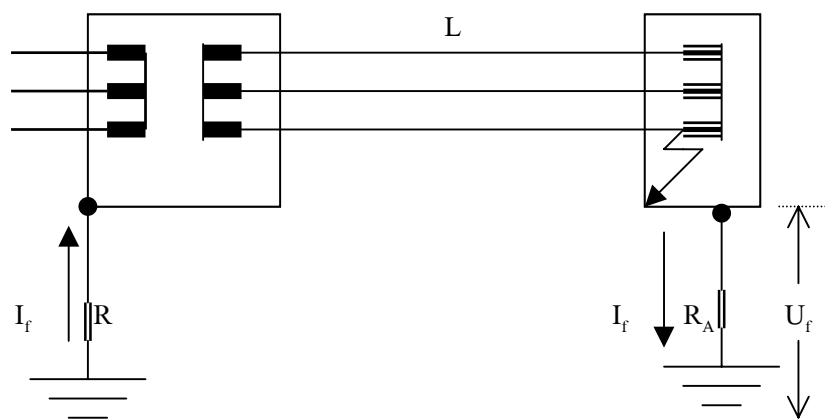
กระแส earth – fault ในระบบ IT

กระแส earth – fault ในระบบ IT จะมีค่าต่ำมาก และมีค่าเดียวกับผลรวมของกระแส Capacitive ของไลน์ ที่ต่ออยู่ในระบบเดียวกัน กระแสดังกล่าวจะมีค่า เปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นอยู่กับผลรวมของความยาวและชนิดของตัวนำที่ใช้ ตามสมการ

$$I_f = 3 \times V_p \times 2\pi \cdot f \cdot C \times 10^{-3} \quad \text{A/km} \quad \text{จากรูปที่ 3.}$$

$$V_p = \text{phase voltage (kV)}$$

$$C = \text{Capacitance ของสายตัวนำในระบบแรงต่ำ} = 0.3 \mu\text{F} / \text{km}$$



สรุปความแตกต่างระหว่างระบบ TN - C system, TT system และ IT system

1. ระยะเวลาในการตัดกระแส (Tripping time) ของฟิวส์เมื่อเกิด fault ลงดินของสาย 1 เฟส

TN - C system ใช้เวลาต่ำกว่า 30 วินาที ในทุกกรณี

TT system ตัดถาวรในทุกกรณี

IT system "

2. ความต่างศักย์ระหว่างส่วนเปิดโล่งและดินของสาย 1 เฟส เมื่อเกิด fault ลงดิน

TN - C system สูงสุด 120 โวลต์ในทุกกรณี เมื่อความต้านทานสูงสุดที่ปลายสายเป็น 4 เท่าของความต้านทานดินที่แหล่งจ่าย

TT system	อยู่ระหว่าง 120 โวลต์ (ความต้านทานของดินเท่ากับ 5 โอห์ม) กับ 210 โวลต์ (ความต้านทานดิน 50 โวลต์
IT system	สูงสุด 20 โวลต์ ในทุกกรณี ยกเว้นถ้าเกิด fault พร้อมกัน 2 เฟส จะมีค่าเท่ากับ 100 โวลต์

บทสรุป :

1. ระบบ LV - system อย่างน้อยที่สุด ต้องจัดเป็นระบบ 4 สาย ที่ระบบการต่อลงดินมีประสิทธิภาพ โดยการต่อลงดินสายนิวตรอนอย่างน้อย ณ จุดที่เรียกว่า zero point และที่ปลายสาย (end point) เพื่อที่จะเป็นการป้องกัน ระบบแรงต่ำจากการเกิด fault ลงดิน
2. ในระบบ TN system ทั้ง 3 ชนิด ระบบ TN - C จะเป็นที่นิยมใช้มากกว่า เนื่องจากจะเสียค่าใช้จ่ายต่อระบบที่ต่ำกว่า
3. ระบบเครือข่ายแรงต่ำที่ไม่มีจุดต่อลงดินของสายนิวตรอน เช่น TT - system โดยพื้นฐานแล้วเป็นไปได้ที่จะป้องกันระบบได้โดยไม่มีรีเลย์ การติดตั้ง ระบบนี้จึงใช้เฉพาะกรณีพิเศษมาก เช่น มอเตอร์ 3 เฟส ในระบบอุตสาหกรรม
4. การต่อลงดินของส่วนเปิดโล่งต่างหากโดยไม่ได้เชื่อมต่อกับสายตัวนำนิวตรอน เช่น TT - system จะเกิดโวลต์ตกคร่อมระหว่างส่วนเปิดโล่งกับดิน มีค่าขึ้นอยู่กับความต้านทานของหลักดิน จึงเป็นการยากที่จะควบคุมค่าความต้านทานให้มีค่าต่ำได้ ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องกำหนดให้โวลต์มีค่าเท่ากับในระบบ 4 สายที่มีสาย PEN ยิ่งกว่านั้นระบบเครือข่ายชนิดนี้ยังไม่สามารถใช้ฟิวส์ในการป้องกันระบบด้วย
5. เป็นการยากที่จะจัดระเบียบของกราวด์อิสระสำหรับผู้บริโภคแต่ละราย เพราะถ้าผู้บริโภคแต่ละรายมีกราวด์อิสระเป็นของตนเอง ก็จะมีจำนวนหลักดินจำนวนมากในระบบ และเป็นการยากพอ ๆ กันทีเดียวสำหรับผู้จ่ายไฟที่จะตรวจเช็คจุดต่อลงดินทั้งหมด และให้ความมั่นใจได้ว่าระบบเครือข่ายทั้งหมดถูกป้องกันอยู่ตลอดเวลาแล้ว
6. เพียงทางเดียวที่จะจัดความเสี่ยงต่าง ๆ ทั้งหมดไปได้ คือการใช้ earth - fault detecting protection เช่น earth fault relays ในระบบแรงต่ำแต่วิธีการนี้ก็ทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นมากอย่างไม่น่าเชื่อ
7. ตามบัญญัติของ UTE ให้โวลต์ตกคร่อมสูงสุดมีได้เพียง 50 โวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ earth fault relays