Scott결선 변압기의 전압 전류 분포와 차동 보호

글/김 정 철
(주)태정시스템 고문/기술사

아래의 원고의 앞 부분은 본인의 저서인 「자가용 전기 설비의 모든 것 1998. 10 기다리 간」에서 발췌 요약한 것이고 뒷 부분의 Scott결선 변압기의 차동 보호는 Scott결선 변압기를 설치하면서 얻은 경험을 바탕으로 정리한 것이다. 대형 Scott결선 변압기는 우리나라에서 전기철도의 급전용 이외에는 사용되는 데가 거의 없음으로 일반인은 Scott결선 변압기와 접할 기회가 그리 많지 않으리라 믿는다.

Scott결선 변압기는 3상에서 단상을 얻기 위하여 단상 변압기 2대를 T형으로 결선한 것으로 미국의 Scott교수에 의하여 고안된 결선방식이다. 이 결선 변압기를 일반적으로 Scott변압기라고 칭하고 있다.

따라서 Scott결선은 분리된 단상 변압기 2대를 외부에서 결선하여도, 동일 탱크내 2대를 수납하여도 지장이 없다. Scott결선 변압기는 단일 철심도 가능하나 설계의 자유도가 적어 설계에 여러가지 제약이 있으므로 특별한 경우를 제외하고는 2 core로 하는 것이 일반적이라고 한다.

1. 권선의 Turn수와 전류의 분포

① 결선과 전압 Vector

변압기의 M좌 1차 권선수를 N, 2차 권선수를 n이라 하면 1, 2차 권선 수는 다음 표와 같다.

구 분	1차 권선 수	2차 권선 수
M좌 변압기	N	n
T좌 변압기	0.866N[1]	n

$$주\ 1)\ 0.866N = \frac{\sqrt{3}}{2}N$$

위에서 보는 바와 같이 Scott결선 변압기라 함은 1, 2차 권선 비가 N: n인 단상 변압기(M좌 변압기) 1대와 권선 비가 0.866N: n 인 단상 변압기(T좌 변압기) 1대를 M좌 1차 권선의 중간점 O에 T형으로 결선한 것을 말한다.

따라서 M좌 변압기는 1, 2차가 동일한 철심에 감겨 있음으로 변압기 임피던스를 무시하면 그 전압은 1, 2차 동상이고, T좌 변압기 1, 2차도 동상이 된다. 즉 M좌의 2차 전압 V_M은 1차의 BC 선간 전압 V_{bc}와, T좌의 2차 전압 V_T는 A상의 1차 상전압 V_a와 동상이다.

M좌 2차 전압 V_M은 V_{bc}와 동상, T좌 2차 전압 V_T는 V_a와 동상임으로 그림 1과 같이 V_M과 V_T는 Vector상으로 90°가 된다.

따라서 A상을 기준 Vector로 했을 때

$$V_{ca} = V_a + j\frac{1}{2}V_{bc} = 0.866V_{bc} + j0.5\ V_{bc}$$

$$|V_{ca}| = \sqrt{0.5^2 + 0.866^2}\,|V_{bc}|$$

$$= |V_{bc}| = |V_{ab}|$$

로 1차 전압은 평형을 이룬다.

② 전류의 분포

다음과 같이 기준 Vector를 V_A로 하고 부하 역률을 1이라 할 때 M좌 2차 전류를 I_M, T좌 2차 전류를 I_T, 각 좌의 1차 환산 전류를 I_{1M}, I_{1T}라하면

다음의 관계가 성립한다.

$$I_{1M} = \frac{n}{N} \times I_M,$$

$$I_{1T} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{n}{N} \times I_T = 1.1547 \times \frac{n}{N} \times I_T$$

이제 A상을 기준 Vector로 하고 M, T좌에 같은 크기의 부하가 걸렸을 때 변압기의 각상 1차 전류를 계산하여 보면

A상 전류 :M좌에 의한 전류 0

T좌에 의한 전류

$$I_{1T} = \frac{n}{0.866N} \times I_T = 1.1547 \times \frac{n}{N} \times I_T$$

B상 전류 :M좌에 의한 전류

$$I_{1M} = -jI_M \times \frac{n}{N}$$

T좌에 의한 전류

$$I_{1T} = -\frac{1.1547}{2} \times \frac{n}{N} \times I_T$$

$$= -0.577 \times \frac{n}{N} \times I_T$$

$$\therefore I_b = (-0.577I_M - jI_M) \times \frac{n}{N}$$

$$|I_b| = \frac{n}{N} \times I_M \times \sqrt{1+0.577^2}$$

$$= 1.15I_M \times \frac{n}{N}$$

Vector각은

$-(90° + \tan^{-1}0.577) = -(90° + 30°) = -120° = 240°$

C상 전류 :M좌에 의한 전류

$$I_{1M} = jI_M \times \frac{n}{N}$$

T좌에 의한 전류

$$I_{1T} = -\frac{1.1547}{2} \times \frac{n}{N} \times I_T$$

$$= -0.577 \times \frac{n}{N} \times I_M$$

$$\therefore I_c = (-0.577I_M + jI_M) \times \frac{n}{N}$$

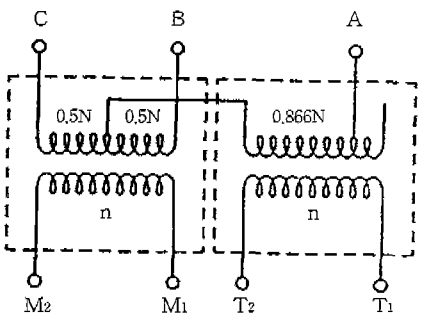
$$|I_c| = \frac{n}{N} \times I_M \times \sqrt{1+0.577^2}$$

$$= 1.15I_M \times \frac{n}{N}$$

Vector각은 A상을 기준으로 할 때

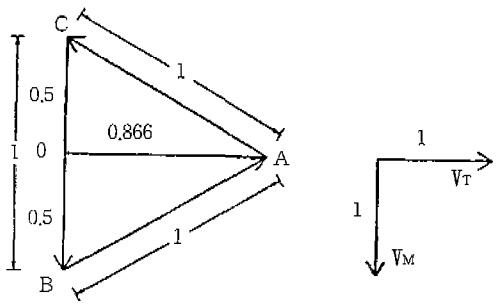
$90° + \tan^{-1}0.577 = 90° + 30° = 120°$

즉, M좌, T좌가 평형 부하일 때에는 변압기 1차 전류는 그 크기가 같고 120°씩 상차 각이 발생하므로 3상 평형이 됨을 알 수 있다(그림 2).



M좌변압기 T좌변압기

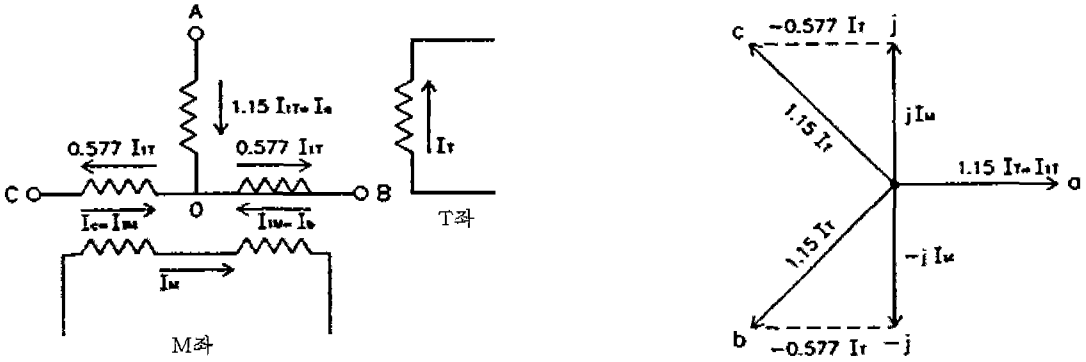
(a) 결선도



1차전압 2차전압

(b) 전압 Vector도

그림 1 Scott결선과 전압 Vector도



(a) 결선도 (b) Vector도

그림 2 Scott결선 변압기의 전류

Scott결선 변압기에 있어 M좌 , T좌에 각각 불평형 부하가 걸려 있을 때의 1차측 전류 또한 불평형이 된다. 극단적인 예는 M좌 또는 T좌에만 부하가 걸려 있을 때도 이와 같은 경우를 검토하여 보면 다음과 같다. 편의상 1차 2차 권선비를 1: 1, 2차 정격 전류를 1pu, A상을 기준 Vector로 할 때

M좌에만 부하가 걸린 경우

$I_{IM} = I_M = -j$

$I_{IT} = I_T = 0$

$\therefore I_a = 0$

$I_b = -I_c = -j$

T좌에만 부하가 걸린 경우

$I_{IM} = I_M = 0$

$I_{IT} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_T = 1.1547$

$I_a = 1.1547$

$I_b = I_c = -0.577$

위의 결과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1의 값은 A상을 기준 Vector로 하고 변압기 1, 2차 권선비가 1: 1, 부하 역률이 1일 때 M좌 부하 전류 값을 1PU로 한 실효치이다. 여기서 j는 90°진상(leading), −j는 90° 지상(lagging)이다. 따라서, 1차 전압 V_1, 2차 전압을 V_2라 하면 2차 전류를 구하고 1, 2차 전압비 $(\frac{V_1}{V_2})$와 표 2의 계수를 2차 전류에 곱하면 1차 전류가 구하여 진다.

3. 수치 계산 예

① 표 1 의 계수에 의한 계산 예

1차 전압 154kV, 2차 전압 50kV인 Scott결선 변압기에 M좌, T좌에 역률 1인 10MVA 평형 부하가 걸려 있을 때와 각 좌에 10MVA인 불평형 부하가 걸렸을 때 표 1의 계수를 이용하여 계산하여 보면 다음과 같다.

(a) M좌에 10 MVA인 경우

A상을 기준 Vector로 하면 부하 역률이 1임으로 V_M은 V_a보다 90° 늦고, 또, 전류 I_M도 V_a보다 90° 늦으며, 그 크기는

$$I_M = \frac{10000kVA}{50kV} = 200\ [A]$$

이므로, 표 1의 계수를 200 [A]에 곱하면

$I_a = 0$

$I_b = -j(\frac{50}{154}) \times 200 = -j64.94$

$= 64.94 \angle 270°\ [A]$

표 1 Scott결선 변압기의 전류비

구 분	2 차		1 차		
	M좌	T좌	A 상	B 상	C 상
M,T좌 평형부하	−j	1	1.1547∠0°	1.1547∠240°	1.1547∠120°
M좌만 전부하시	−j	0	0	−j	j
T좌만 전부하시	0	1	1.1547	−0.577	−0.577

표 2

상	M좌만 부하시	T좌만 부하시	M좌 및 T좌 평형부하
A	0	74.78∠0°	74.98∠0°
B	−j64.94	−37.49	−37.49 − j64.94=74.98∠240°
C	j64.94	−37.49	−37.49 + j64.94=74.98∠120°

$$I_c = -j(\frac{50}{154}) \times 200 = -j64.94$$
$$= 64.94\angle 90^\circ \ [A]$$

(b) T좌에 10 MVA인 경우

T좌에만 부하가 걸렸을 때에는 T좌의 전류 I_T는 A상 전압 V_a와 동상이므로 표 1의 계수를 곱하면

$$I_a = (\frac{50}{154}) \times 1.1547 \times 200$$
$$= 74.98\angle 0^\circ \ [A]$$
$$I_b = -(\frac{50}{154}) \times 0.577 \times 200$$
$$= -37.49 = 37.49\angle 180^\circ \ [A]$$
$$I_c = -(\frac{50}{154}) \times 0.577 \times 200$$
$$= -37.49 = 37.49\angle 180^\circ \ [A]$$

(c) M, T좌에 각각 10 MVA의 평형 부하가 걸렸을 때

위에서 계산한 (a)와 (b)의 합계이므로 내용은 표 2와 같다. 즉 1차 측은 각상 모두 전압과 전류가 역률각 0°인 3상 평형이 된다.

② 수식에 의한 계산

이제 상전류를 수식으로 표시 하면 그림 1에 의하여,

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \times I_{1T}$$
$$I_b = I_{1M} - \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{1T}$$
$$I_c = -I_{1M} - \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{1T}$$

여기서 굵게 표시한 것은 Vector표시이다.
위 예를 수식으로 풀어 보면 다음과 같다.

(a) M좌에 10 MVA인 경우

$$I_{1M} = (\frac{50}{154}) \times 200\angle 90^\circ$$
$$= 64.94\angle 270^\circ$$

$$I_{1T} = (\frac{50}{154}) \times 200\angle 0^\circ$$
$$= 64.94\angle 0^\circ$$

이므로 A 상을 기준 Vector로 하면 V_M은 V_a보다 90° 늦고 그 크기는

$$I_M = \frac{10000kVA}{50kV} = 200 \ [A]$$

$$I_{1M} = (\frac{50}{154}) \times (200\angle 90^\circ)$$
$$= 64.94\angle 270^\circ \ [A]$$

따라서,

$$I_a = 0 \ [A]$$
$$I_b = 64.94\angle 270^\circ = -j64.94$$

$$I_c = -64.94\angle 90^\circ$$
$$= 64.94\angle 90^\circ = j64.94$$

(b) T좌에 10 MVA인 경우

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \times I_{1T} = 74.98\ [A]$$

$$I_b = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times 64.94\angle 0^\circ$$
$$= -37.49\angle 0^\circ = 37.49\angle 180^\circ$$

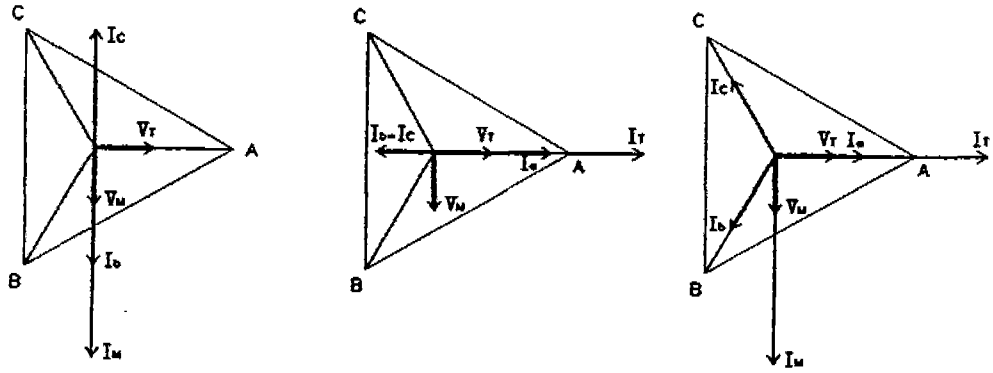
$$I_c = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times 64.94\angle 0^\circ$$
$$= -37.49\angle 0^\circ = 37.49\angle 180^\circ$$

(c) M, T좌에 10 MVA 평형 부하가 걸린 경우

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \times I_{1T} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times 64.94 = 74.98\ [A]$$

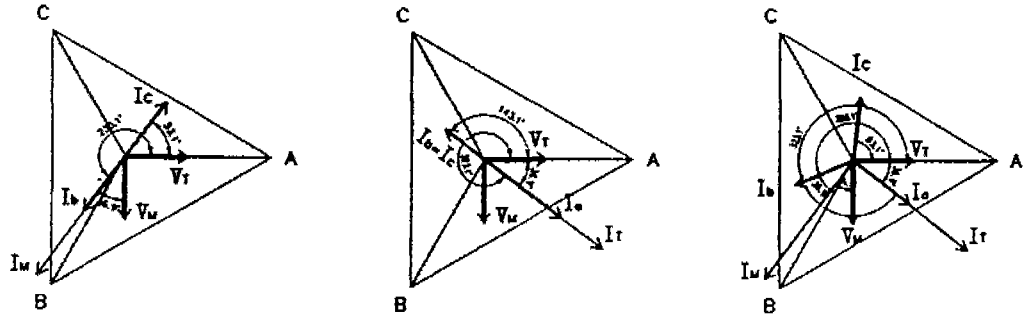
$$I_b = 64.94\angle 270^\circ - \frac{1}{\sqrt{3}} \times 64.94\angle 0^\circ$$
$$= 64.94\angle 270^\circ - 37.49\angle 0^\circ$$
$$= -37.49 - j64.94 = 74.98\angle 240^\circ$$

$$I_c = -64.94\angle 90^\circ - \frac{1}{\sqrt{3}} \times 64.94\angle 0^\circ$$
$$= -64.94\angle 90^\circ - 37.49\angle 0^\circ$$
$$= -37.49 - j64.94 = 74.98\angle 120^\circ$$



(a) M좌 부하시 (b) T좌 부하시 (c) M, T좌 평형 부하시

그림 3 전류 Vector도



(a) M좌 부하시 (b) T좌 부하시 (c) M, T좌 평형 부하시

그림 4 전압 전류 Vector도

위의 계산 결과를 A상을 기준Vector로 하여 Vector도를 그리면 그림 3과 같이 된다.

③ 부하 역률이 0.8일 때의 계산

이제 부하의 역률이 0.8이라 하면 위의 Vector도에서 $\theta=\tan^{-1}0.8=36.9°$ 즉, 36.9°씩 전류가 늦어짐으로

(a) M좌 부하시

$I_a = 0$

$I_b = 64.94\angle(270°-36.9°) = 64.94\angle 233.1°$

$I_c = 64.94\angle(90°-36.9°) = 64.94\angle 53.1°$

B상의 V_b와 I_b의 역률 각은

$240° - 233.1° = 6.9°$

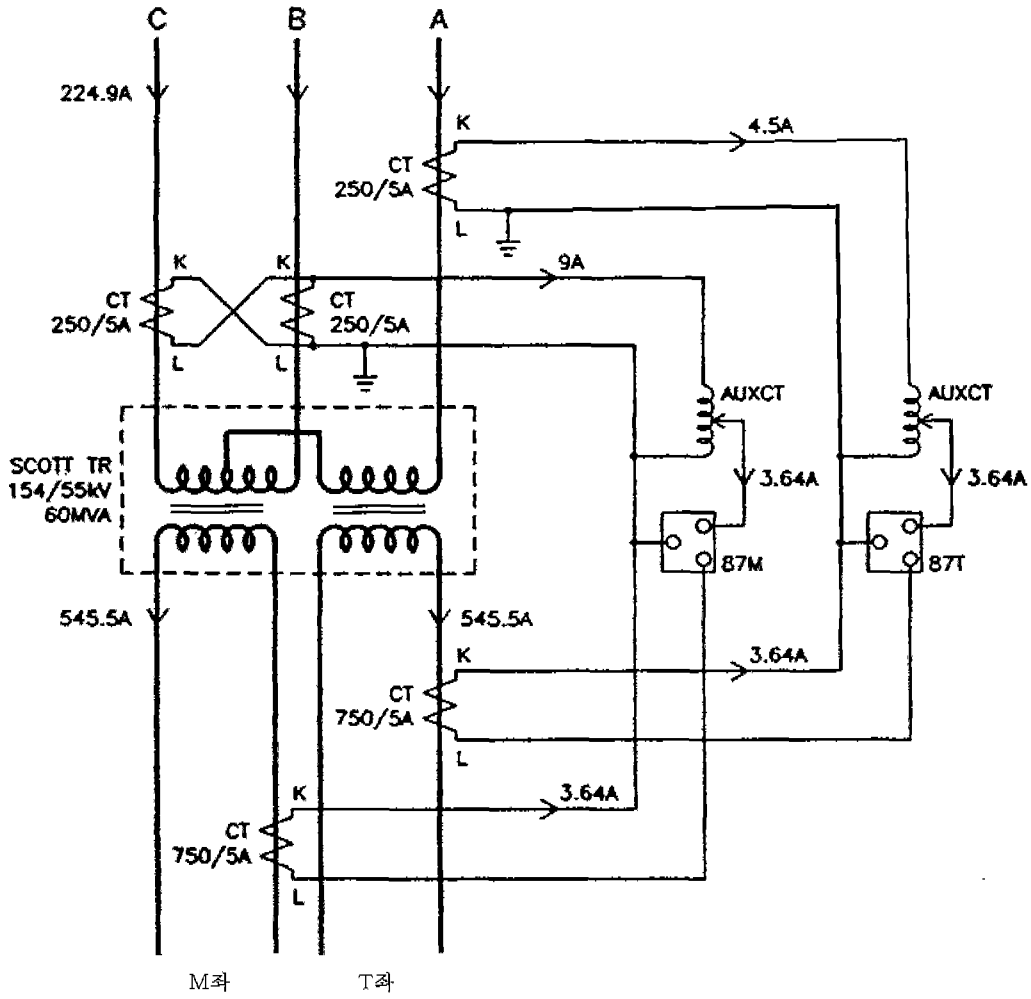


그림 5 Scott결선 변압기 차동 보호

C상의 V_c와 I_c의 역률 각은
$-(120^\circ - 53.1^\circ) = -66.9^\circ$

(b) T좌에 10 MVA인 경우

T좌에만 부하가 걸렸을 때에는 T좌의 전류 I_T는 A상 전압 V_a보다 36.9°가 늦으므로

$$I_a = 74.98\angle 36.9^\circ = 74.98\angle 323.1^\circ$$
$$I_b = 37.49\angle(180^\circ - 36.9^\circ) = 37.49\angle 143.1^\circ$$
$$I_c = 37.49\angle(180^\circ - 36.9^\circ) = 37.49\angle 143.1^\circ$$

(c) M, T좌에 각각 10 MVA의 평형 부하가 걸렸을 때

A상 1차 전류
$$I_a = 74.98\angle(360^\circ - 36.9^\circ) = 74.98\angle 323.1^\circ$$
B상 1차 전류
$$I_b = 74.98\angle(240^\circ - 36.9^\circ) = 74.98\angle 203.1^\circ$$
C상 1차 전류
$$I_c = 74.98\angle(120^\circ - 36.9^\circ) = 74.98\angle 83.1^\circ$$

즉, 1차측은 각상 모두 전압과 전류가 역률각 36.9°인 3상 평형이 된다.

5. Scott결선 변압기의 보호

그림 5에서 보는 바와 같이 1, 2차 권선비가 1:1인 Scott결선 변압기에서는 T좌에 전류 I_T가 흐를 때 그에 대응하는 1차 A상에는 $I_A = 1.15I_T$가 B, C상에는 I_A의 1/2인 $I_B = -0.577I_T$ 및 $I_C = -0.577I_T$가 M좌의 부하와는 관계 없이 각각 흐르게 된다. 따라서 M좌 계전기의 오동작을 방지하고 이들 T좌 전류를 상쇄하기 위하여 B, C상의 CT는 서로 차동 결선을 한다. 차동 결선을 하면 CT의 2차 전류 T좌 전류는 Vector방향이 같으므로 합은 0이 되나 M좌에 흐르는 부하 전류는 Vector방향이 180°로 되어 합계가 2배로 된다. 이제 Scott결선 변압기에 평형 부하가 걸려 있고 CT전류비가 서로 같을 때 CT 2차 전류를 I라하면

T좌 1차 CT	1.15I
T좌 2차 CT	I
M좌 1차 CT	2×1.15I
M좌 1차 CT	I

와 같이 된다. 이 1, 2차 전류 차이는 보조 CT로 보상하고 M좌용 비율차동계전기는 M좌 1, 2차 사이에, T좌용 비율차동계전기는 T좌 1, 2차 사이에 각각 설치한다. 만일 2차 단상 회로의 CT를 차동 결선을 하는 경우 M좌에는 1, 2차 간의 보조 CT가 필요 없게 된다.

AT급전 회로에서는 타선 흡상 현상을 보상하기 위하여 AF와TF의 CT를 차동 결선을 하는 때가 많다. 일본 계전기 제작회사에서는 AT급전 계통에서는 CT를 차동 결선하도록 권장하고 있다.

또, 특히 유의할 점은 Scott결선 변압기에 있어서 부하뿐만 아니라 권선의 결선도 3상 평형이 아니며 BC상의 전류 차는 위상차가 180°이므로 $I_B - I_C = 2I_B$가 되고, M좌 권선 지락 등 고장시에만 B, C상에 차가 1.732배가 되는 전류가 흐른다는 점이다.

잘못하여 변압기 1, 2차 권선의 CT 2차 접지선으로 87계전기가 단락(short)될 우려가 있으므로 주의 바란다.

그림 5는 용량 60MVA 전압이 154/55kV인 Scott 변압기에 대한 비율차동계전기의 결선도이고 아래는 그 정정 예이다.

T좌 2차 전류
$$I_T = \frac{30000}{55} = 545.5\ [A] \quad \cdots CT\ 750/5$$

T좌 1차 전류
$$I_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{55}{154} \times 545.5 = 224.9\ [A] \cdots CT\ 250/5$$

M좌 2차 전류
$$I_T = \frac{30000}{55} = 545.5\ [A] \quad \cdots CT\ 750/5$$

M좌 1차 전류
$$I_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{55}{154} \times 545.5 = 224.9\ [A] \cdots CT\ 250/5$$

표 3

구 분	A 상	B 상	C 상	정·역상
기본파	0°	120°	240°	정 상
2조파	0°	240°	480−360=120°	역 상
5조파	0°	120×5=240°	240×5=120°	역 상
11조파	0°	120×11=240°	240×11=120°	역 상

$$Ic = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{55}{154} \times 545.5$$
$$= 224.9\ [A] \qquad \cdots\ CT\ \ 250/5$$

87계전기 입력은 변압기 1, 2차 역률이 같음으로 전류의 크기만 고려하면 된다. 계전기 입력 전류는

T좌 1차

$$i_A = 224.9 \times \frac{5}{250} = 4.5\ [A]$$

T좌 2차

$$i_B = 545.5 \times \frac{5}{750} = 3.64\ [A]$$

T좌 보조 CT

$$n = \frac{3.64}{4.5} = 0.81$$

M좌 1차

$$i_B - i_C = 224.9 \times \frac{5}{250} - \left(-224.9 \times \frac{5}{250}\right)$$
$$= 9\ [A]$$

M좌 2차

$$i_m = 545.5 \times \frac{5}{750} = 3.64\ [A]$$

M좌 보조 CT

$$n = \frac{3.64}{9} = 0.404$$

보조 CT는 이 전류 비율에 가장 적절한 것으로 선정하여 전류 부정합율이 5%를 초과하지 않도록 한다. 여기서 탭절환기에 의한 오차 e_1 = 8~10%, CT 및 계전기 오차 e_2 = 10%, 전류 부정합 e_3 = 5%, 여유율(safety margin)을 e_4=10%로 하면 합계 Σe_i = 33~35%이므로 정정은 35~40%로 하면 된다.

6. 불평형 부하가 계통 타 부하에 미치는 영향

Scott결선 변압기 부하와 같은 불평형 부하는 전원 전압의 불평형의 원인이 된다. 송전단 전압의 전압 불평형은 역상 전류를 흐르게 하여

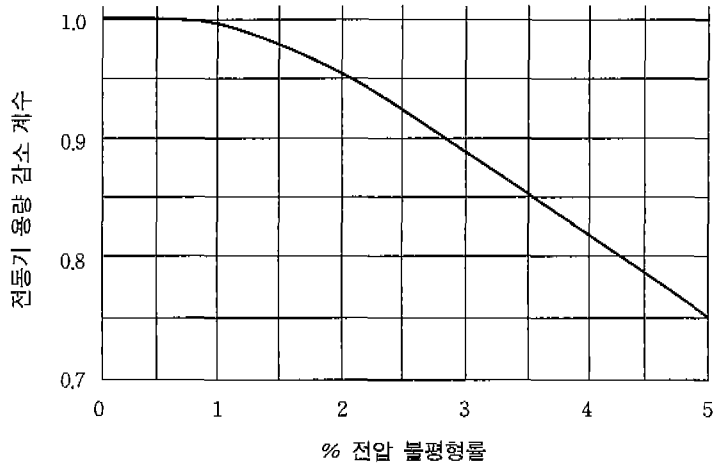
① 발전기의 발전 용량 감소
② 동일 모선에서 수전하는 수용가의 전동기 출력 감소 및 전동기 온도상승
③ 회전기의 회전 Torque 저하

등 특히 회전기기에 심대한 영향을 미치게 된다.

발전기에 불평형 부하에 의한 역상 전류가 흐르면 발전기의 회전 방향과 반대되는 회전 자계가 형성되어 돌극기(突極機)에서는 극표면의 제동권선(Damper winding)을, 또 원통형기에 있어서는 계자 권선 고정용 쐐기(Wedge)와 회전자 표면을 과열되게 하여 발전기의 가능 출력을 저하시키고 기계적 진동의 원인이 되기도 한다.

또 불평형 부하와 동일 모선에 연결되어 있는 회전기 부하에는 모선 용량이 제한되어 있음으로 그 영향을 관가할 수 없게 된다.

미국 전기기계 제작 협회 규격인 NEMA에 의하면 선간 불평형 전압 3%인 경우 유도 전동기 용량은 약 10%, 4.4%인 경우 약 20% 감소하여 적용토록 되어 있다. 이는 불평형 전압에 의하여 발



유도 전동기 용량 감소 계수

생되는 역상 전류로 인한 역회전력과 전동기 1, 2차 권선 발열 양을 감안하여 정한 값이다.

더욱이 단상 부하에 Inverter부하만 걸려 있을 경우 2, 5, 11조파 등 고조파에 의한 역상 전류도 또한 회전기에 영향을 미치게 되므로 Scott변압기에 Inverter부하만을 사용할 때에는 전압 불평형과 함께 동일 모선에 연결되어 있는 회전기 부하에 미치게 될 영향을 사전에 충분히 검토할 필요가 있다.

고조파의 상회전 방향을 보면 표 3과 같이 되어 2, 5, 11조파 등은 기본파에 비하여 B상과 C상의 상회전이 반대이므로 역상인 것을 알 수 있다.

일반적으로 (6N±1)차 조파에서 (6N−1)조파는 역상이 된다.

이 큰 나무 한 그루로 되지 않는다는 것을 우리는 안다. 소나무와 참나무 같은 교목 밑에 조팝나무, 진달래 같은 관목이 나 있고 그 밑에는 고사리, 이끼, 은방울꽃이 살고 아래에는 달팽이, 지렁이, 노린재가 기어 다닌다. 아직 그것으로 숲이 다 된 것은 아니다.

뭇 버섯과 곰팡이, 세균들이 득실거려야 떨어진 낙엽과 드러누운 고목 둥치를 썩힌다. 그래서 한 마리의 뻐꾸기는 그 숲 위에서 그렇게 우짖는 것이다.

그렇다. 모두가 끈끈한 연으로 만나 어울려 더불어 다살이하고 있는 것이다. 우리 사람도 그렇게 도란도란 어울려 살았으면 좋겠다.

- 생물의 다살이, 권오길