

# 同相 多重 케이블의 電流 불평형 해소

류홍우, 김수열

한국전력공사 전력연구원 발전연구실

## 1. 개요

공장 구내 또는 발전소 구내에서 대용량의 전류를 단거리 송전하는 경우 대부분 구리나 알루미늄 바(Bar)를 사용한 모선 방식이 주로 이용되어 왔으나 모선에 대한 관리상의 불편함이 문제점으로 나타나면서 최근에는 케이블을 이용하는 방식이 선호되고 있는 경향이다. 모선 방식의 경우는 구리나 알루미늄 바의 부식문제, 습기 문제, 그리고 좁은 공간에서 사용시 절연 문제 등과 관련하여 지속적인 관리가 요구되고 있으나 케이블을 사용할 경우 이러한 문제들로부터 벗어날 수 있는 이점을 가지고 있다. 그러나 케이블을 사용하여 대 전류를 송전할 경우 단일 케이블의 허용 전류용량에 따른 제한으로 복수의 케이블을 병렬 연결하여 사용하여야 한다. 이러한 방법으로 동일한 상(相)에 대하여 병렬로 케이블을 연결하여 사용하게 되면 케이블 배치 방법에 따라 병렬 연결된 케이블에 임피던스 차이가 발생하고 이로 인하여 케이블간에 전류 불평형 현상이 발생한다. 심할 경우 경험상 800% 이상의 전류 불평형이 발생되어 전체 병렬연결 케이블의 허용전류 용량보다 훨씬 낮은 전류를 송전하게 되고 이로 인하여 케이블의 유효 사용 효율을 저하시키는 현상이 나타난다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 병렬 연결된 케이블의 임피던스가 동일하게 되도록 케이블을 배치함으로써 전류를 평형되게 하여야 한다.

## 2. 모의해석 알고리즘

동일한 상에서 케이블을 병렬로 연결한 경우 각 케이블에 흐르는 전류를 평형시키기 위해서는 병렬 연결된 각 케이블의 임피던스가 동일하도록 케이블을 배치하여

야 한다. 이와 같이 동일한 상에서 병렬 연결된 케이블의 임피던스가 케이블의 배치방법에 따라 어떻게 변화되는가를 해석하는 내용이 JCS168 규격에서 정의되어 있다.

여기서는 동일한 상에서 병렬 연결된 각 케이블에 흐르는 전류를 평형시키는 케이블 배치 방법에 대해서 알아보기로 한다. 전류를 평형시키기 위하여 생각해 볼 수 있는 방법은 각 케이블의 임피던스를 동일하게 하는 방법이 있을 수 있다. 일반적으로 현장에서 사용되는 거리는 짧기 때문에 저항과 캐패시턴스의 크기가 동일하다고 가정하고 각 케이블의 리액턴스를 계산하여 일치시키는 방법을 사용하고 있다. 병렬 연결된 각 케이블에 대한 임피던스와 리액턴스를 구하는 식을 다음에 보인다. 식(1)은 임피던스를 식(2)~(4)는 각 케이블에 대한 리액턴스를 구하는 식이다.

### 가. 임피던스(Z)

각 케이블의 임피던스는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} Z_{R1} &= r + jX_{R1} & Z_{R2} &= r + jX_{R2} & Z_{R3} &= r + jX_{R3} \dots \\ Z_{S1} &= r + jX_{S1} & Z_{S2} &= r + jX_{S2} & Z_{S3} &= r + jX_{S3} \dots (1) \\ Z_{T1} &= r + jX_{T1} & Z_{T2} &= r + jX_{T2} & Z_{T3} &= r + jX_{T3} \dots \end{aligned}$$

### 나. 리액턴스(X)

R, S, T상에 연결된 각 케이블을

$R_1, R_2, R_3, \dots, S_1, S_2, S_3, \dots, T_1, T_2, T_3, \dots$

라고 하면 각 상 케이블의 리액턴스는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} X_{R1} &= \\ 2\pi f [X_o + 2 \log_e \left( \frac{2\sqrt{S_{R1S1}S_{R1S2}S_{R1S3} \dots S_{R1T1}S_{R1T2}S_{R1T3} \dots}}{d_1 S_{R1R2}S_{R1R3}S_{R1R4}} \right) & \\ + j\sqrt{3} \log_e \left( \frac{S_{R1T1}S_{R1T2}S_{R1T3} \dots}}{S_{R1S1}S_{R1S2}S_{R1S3} \dots}} \right) ] \times 10^{-9} \text{ (ohm/cm)} & (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{R2} &= \\ 2\pi f [X_o + 2 \log_e \left( \frac{2\sqrt{S_{R2S1}S_{R2S2}S_{R2S3} \dots S_{R2T1}S_{R2T2}S_{R2T3} \dots}}{d_1 S_{R2R2}S_{R2R3}S_{R2R4}} \right) & \\ + j\sqrt{3} \log_e \left( \frac{S_{R2T1}S_{R2T2}S_{R2T3} \dots}}{S_{R2S1}S_{R2S2}S_{R2S3} \dots}} \right) ] \times 10^{-9} \text{ (ohm/cm)} & (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{S1} &= \\ 2\pi f [X_o + 2 \log_e \left( \frac{2\sqrt{S_{S1R1}S_{S1R2}S_{S1R3} \dots S_{S1T1}S_{S1T2}S_{S1T3} \dots}}{d_1 S_{S1S2}S_{S1S3}S_{S1S4}} \right) & \\ + j\sqrt{3} \log_e \left( \frac{S_{S1R1}S_{S1R2}S_{S1R3} \dots}}{S_{S1T1}S_{S1T2}S_{S1T3} \dots}} \right) ] \times 10^{-9} \text{ (ohm/cm)} & (4) \end{aligned}$$

여기서

$d_1$  : 도체의 외경(mm)

f : 주파수(Hz)

$S_{ij}$  : i 케이블과 j 케이블간의 중심 간격(mm)

$X_o$  : 케이블의 자기 인덕턴스로

- 일반도체의 경우

$$X_o = 1/2,$$

- 중공도체의 경우

$$X_o = \frac{1}{2(d_1^2 - d_0^2)^2}$$

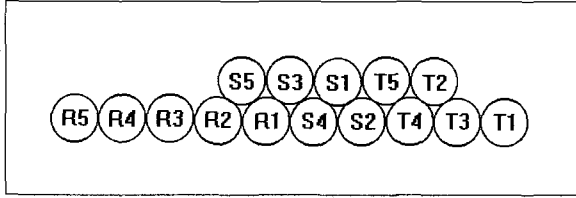
$$[(d_1^4 - d_0^4) - 4(d_1^2 - d_0^2)d_0^2] \div 4d_0^4 \log_e \left( \frac{d_1}{d_0} \right)$$

$d_o$  : 도체의 외경(mm)

## 3. 전류 불평형 발생 실측

### 가. "A" 발전소에서의 불평형 전류

국내 "A" 발전소에서 가교 폴리에틸렌 절연 케이블(CV Cable)을 사용하여 24000/560V의 변압기 2차 측으로부터 약 30m 거리의 제어 정류기에 상당 5개의 케이블을 사용하여 전력을 공급하고 있었다. 이 케이블의 도체 외경은 28.8mm, 전체 외경은 40mm, 그리고



〈그림 1〉 “A” 발전소 케이블 배치도

저항은 0.0369ohm/km이다. 케이블의 배치 상태는 그림 1과 같으며 케이블 트레이에 단단히 고정되었다.

이러한 배치는 초기 전류의 불평형 발생을 예상하지 못하고 배선한 결과였으며 배치후 전류 불평형 발생 가능성을 인지하고 다음과 같은 시험을 실시하여 불평형이 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

변압기의 1차에 3상 220V와 440V 전압을 차례로 인가하면서 제어 정류기의 출력을 단락시키고 제어 신호에 따라 각 케이블에 흐르는 전류를 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 기록한 자료는 동시에 측정된 것이 아니라서 정확히 일치하지는 않겠지만 큰 차이는 없을 것으로 생각한다.

1) 1차시험 : 220V 전압 인가 시험

- 변압기 1차 인가 전압 : 3상 220V
- 변압기 2차 전압 측정 값 :  $V_{RS}=2.94V$   $V_{ST}=2.60V$   $V_{TR}=2.75V$
- 제어 정류기 직류 출력 전류 : 200A
- 변압기 2차 상별 각 케이블의 전류 분포

〈표 1〉 변압기 1차측에 220V 인가시의 케이블별 전류 분포

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)
R1	71.1	S1	65.0	T1	9.7
R2	24.2	S2	31.0	T2	22.0
R3	16.2	S3	9.2	T3	19.3
R4	12.4	S4	54.6	T4	67.0
R5	21.8	S5	41.6	T5	35.0
계	145.7	계	201.4	계	153

2) 2차시험 : 440V 전압 인가 시험

- 변압기 1차인가 전압 :  $V_{RS}=473V$   $V_{ST}=471V$   $V_{TR}=472V$
- 변압기 2차전압 측정값 :  $V_{RS}=5.44V$   $V_{ST}=4.50V$   $V_{TR}=5.01V$
- 제어 정류기 직류 출력 전류 : 540A
- 변압기 2차 상별 각 케이블의 전류 분포

〈표 2〉 변압기 1차에 440V 인가시 케이블별 전류 분포

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)
R1	182.0	S1	164.0	T1	20.3
R2	61.0	S2	75.6	T2	55.9
R3	39.0	S3	48.0	T3	43.6
R4	29.0	S4	136.5	T4	166.5
R5	51.6	S5	107.0	T5	86.0
계	362.6	계	531.1	계	372.3

변압기 2차와 제어 정류기 사이에 연결된 5개의 케이블에서 변압기 1차 권선에 인가하는 전압의 크기를 순차적으로 변화시키면서 실측한 케이블 별 전류의 크기가 심한 차이를 나타내고 있었다. 3상 220V를 변압기 1차 권선에 인가한 1차 시험에서 발생하는 최대 전류의 차이는 S상으로 최대 케이블 전류 65.0A, 최소전류 9.2A로 최소전류 기준 707%의 차이를 보이고 있으며, 2차 시험의 경우에는 T상에서 최대 케이블 전류 166.5A, 최소 전류 20.3A로 820%의 차이를 보이고 있다.

나. “B” 발전소의 불평형 전류

“B” 발전소에서 “A” 발전소와 유사한 현상이 발생되고 있었다. 건설당시부터 변압기 2차에서 상당 4개의 케이블을 이용하여 제어 정류기에 전력을 공급해 왔는데, 운전중 일부 케이블에서 가열 현상이 발견되었으나

운전에는 크게 지장을 초래하지 않아 그대로 사용해 오고 있었다. 전체 길이에 대한 케이블의 배치는 정확히 확인할 수 없었지만 케이블의 표피가 더워지는 현상으로 개략적인 전류의 분포를 추측할 수 있었으며 최종단에서 각 케이블에 대한 전류를 측정하여 전류 분포를 확인하였다. 케이블의 배치는 왼쪽에서부터 R상의 케이블이 4개, 다음에 S상의 케이블이 4개 그리고 마지막으로 T상의 케이블이 4개가 나란히 배열되어 있었으며 배열 위치에 따라 각 상별 4개의 케이블이 서로 엇갈려 배치되는 경우도 있었다. 케이블의 배치에 따라 번호를 왼쪽에서부터 1~12번까지 부여할 때 1~4번 케이블은 R상, 5~8번 케이블은 S상, 9~12번 케이블은 T상에 연결된다. 이들 중 전류의 분포가 큰 것은 R상과 S상이 가까운 4번과 5번 케이블, 그리고 S상과 T상이 가까이 있는 8번과 9번 케이블이었다. 이 경우 R상의 최대/최소 전류차이는 327%, S상은 295%, T상은 402%를 보이고 있었으며 케이블별 전류는 표 3과 같다.

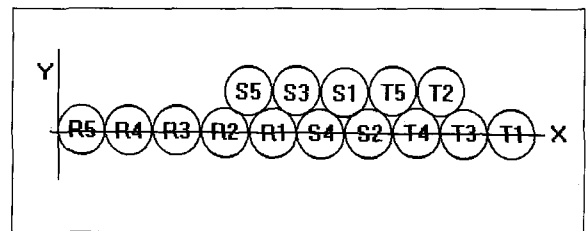
〈표 3〉 "B" 발전소 케이블 전류 분포

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)
R?	324	S5	702	T9	755
R?	221	S?	346	T?	208
R?	300	S?	238	T?	188
R4	723	S8	680	T?	416
계	1567	계	1966	계	1568

#### 4. 전류 불평형에 대한 해석

전류 불평형의 원인이 동일한 상에서 병렬로 연결된 케이블간에 임피던스의 차이로 인하여 발생되고 있으나 저항값의 크기는 동일하다고 가정하고 JCS168에서 정의하고 있는 리액턴스를 MATLAB 프로그램을 사용하

여 해석해 보았다. MATLAB 프로그램 수행시 각 케이블의 좌표는 그림 2를 기준으로 다음의 값을 입력하면 거리 S가 계산되도록 하여 케이블별 리액턴스 값을 출력하도록 하였으며 리액턴스의 단위는  $1.0 e^{-4} \text{ohm/cm}$ 이다.



〈그림 2〉 상별 5개 케이블 배치 좌표

〈표 4〉 상별/케이블별 X, Y 좌표 값

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	좌표(X, Y)	케이블 번호	좌표(X, Y)	케이블 번호	좌표(X, Y)
R1	180, 0.000	S1	240, 34.641	T1	380, 0.000
R2	140, 0.000	S2	260, 0.000	T2	320, 34.641
R3	100, 0.000	S3	220, 34.641	T3	340, 0.000
R4	60, 0.000	S4	220, 0.000	T4	300, 0.000
R5	20, 0.000	S5	160, 34.641	T5	280, 4.641

〈표 5〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.3680	S1	0.4171	T1	0.4200
R2	0.4942	S2	0.3637	T2	0.3653
R3	0.5939	S3	0.2559	T3	0.3513
R4	0.6344	S4	0.1629	T4	0.3188
R5	0.5934	S5	0.2787	T5	0.3475

리액턴스의 계산 결과를 표 1과 2의 실측한 전류 분포와 비교해 보면 R상과 T상의 경우는 리액턴스의 크기 변화와 전류 분포가 유사한 형태를 가지지만 S상의

경우는 상호 관계가 잘 나타나지 않는 것을 알 수 있다. MATLAB 프로그램 작성상 문제가 있었던 것이 아닌가 하여 JCS168에서 제시하는 케이블 별 추천 모델을 적용하여 확인하였으나 이상이 없었다. 현재로서는 S 상에 대하여 차이가 발생하는 원인을 명확히 밝히지 못함을 안타깝게 생각하고 있다. JCS168에서 제시하는 동상에서 전류 평형이 되는 케이블 배치는 다음에 보여주는 그림 9, 10, 11, 그리고 12이다. 이 중에서도 그림 10은 약간의 불평형이 발생한다. JCS168에서 제시하는 전류 평형이 되는 관련 케이블 배치에 대한 각 케이블의 리액턴스는 해석 결과를 보면 그림 10을 제외하고는 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다.

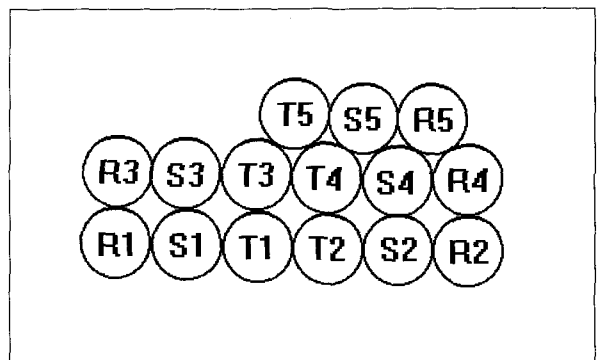
## 5. 케이블 배치에 따른 리액턴스 변화

3상 상간의 전류 평형은 3상이 동일한 거리를 유지할 수 있는 구조, 즉 정삼각형의 구조를 가질 때에만 가능하다. 3상에서 상간 전류 평형과 각상의 케이블간 전류 평형을 동시에 만족시킬 수 있는 경우는 각 상당 케이블을 하나로 하여 총 3개의 케이블을 삼각형 배치 방법으로 포설할 때에만 가능하며 이러한 내용은 그림 14와 표 15에서 알 수 있다.

다음에는 상별 케이블 수의 변화에 의한 케이블 배치 방법과 그에 따른 리액턴스의 해석결과를 보여준다. 상별 5개의 케이블 배치 방법에 대하여는 다음에 예로 든 배치 방안 이외에도 여러 배치 방안을 해석하였으나 어떤 방안에서도 전류 평형을 얻을 수 있는 방안을 찾을 수가 없었다. 그 가운데서는 그림 5의 케이블 배치가 가장 차이가 작은 것으로 나타났다. 그림 5에서 각상의 케이블의 리액턴스 차이가 크지 않으나 T상의 4번 케이블과 5번 케이블의 리액턴스 차이가  $0.044e^{-4}$

ohm/cm로 가장 크게 나타났다. 정격전류를 허용하면서 차이가 보다 작은 배치 방안을 찾기 위하여 1개의 케이블을 추가한 상별 6개의 케이블을 사용하는 것을 전제로 각각의 배치 방안에 대하여 검토하였다. 이 결과 5개의 케이블 사용 배치 방안보다 리액턴스 차이가 작게 나타나는 그림 7의 배치 방안을 얻을 수 있었으며 이 배치 방안을 이용하여 발전소에서는 케이블 결선을 다시 하고 재배치하여 사용하게 되었다. 이 이외에도 상 별 케이블의 수를 변화시키면서 해석한 결과를 참고로 다음에 보인다. 이후 모든 표에서 사용된 리액턴스의 단위는  $1.0e^{-4}$  ohm/cm이다.

### 가. 상별 5개 케이블 사용 배치도(1)

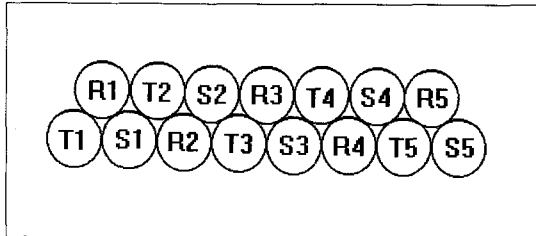


〈그림 3〉 상별 5개 케이블 배치(1)

〈표 6〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림3)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1516	S1	0.1421	T1	0.2232
R2	0.2222	S2	0.1021	T2	0.2053
R3	0.1475	S3	0.1506	T3	0.2400
R4	0.2578	S4	0.0876	T4	0.2217
R5	0.1729	S5	0.1852	T5	0.2459

나. 상별 5개 케이블 사용 배치도(2)

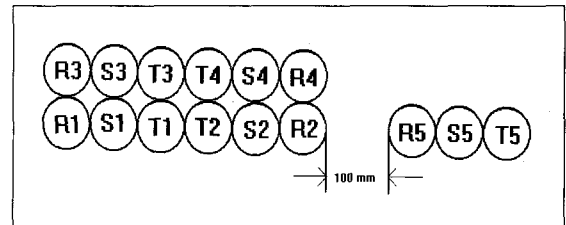


〈그림 4〉 상별 5개 케이블 배치(2)

〈표 7〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림4)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1525	S1	0.0380	T1	0.1900
R2	0.1169	S2	0.0354	T2	0.1224
R3	0.1132	S3	0.0756	T3	0.0756
R4	0.1169	S4	0.1224	T4	0.0354
R5	0.1525	S5	0.1900	T5	0.0380

라. 상별 5개 케이블 사용 배치도(4)

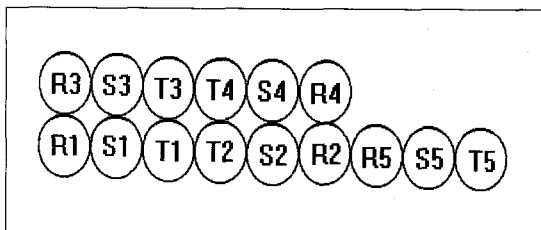


〈그림 6〉 상별 5개 케이블 배치(4)

〈표 9〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림6)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1961	S1	0.1008	T1	0.1745
R2	0.2163	S2	0.1034	T2	0.1875
R3	0.1960	S3	0.1010	T3	0.1748
R4	0.2146	S4	0.1038	T4	0.1878
R5	0.2125	S5	0.1140	T5	0.1320

다. 상별 5개 케이블 사용 배치도(3)



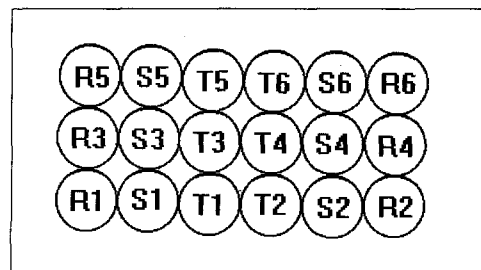
〈그림 5〉 상별 5개 케이블 배치(3)

〈표 8〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림5)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1999	S1	0.0960	T1	0.1658
R2	0.2537	S2	0.0978	T2	0.1817
R3	0.1997	S3	0.0964	T3	0.1666
R4	0.2390	S4	0.0989	T4	0.1825
R5	0.2612	S5	0.1291	T5	0.1381

마. 상별 6개 케이블 사용 배치도(1)

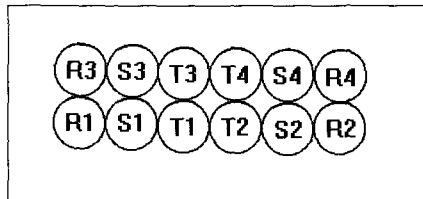
상별로 6개의 케이블을 사용하여 그림 7, 8과 같이 배치하여 리액턴스를 해석하였으며 결과는 표 10, 11과 같다. 몇 가지 다른 방안에 대하여도 해석하여 보았으나 그림7의 방안이 상별 케이블 별 리액턴스의 차이가 가장 작게 나타났다.



〈그림 7〉 상별 6개 케이블 배치(1)

〈표 10〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림7)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1829	S1	0.1413	T1	0.2391
R2	0.1829	S2	0.1413	T2	0.2391
R3	0.2133	S3	0.1523	T3	0.2667
R4	0.2133	S4	0.1523	T4	0.2667
R5	0.1829	S5	0.1413	T5	0.2391
R6	0.1829	S6	0.1413	T6	0.2391

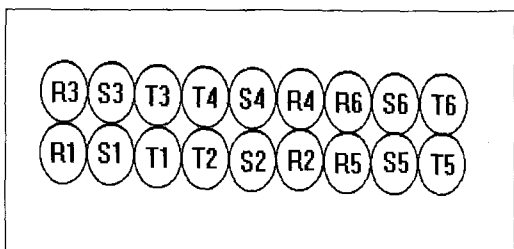


〈그림 9〉 상별 4개 케이블 배치

〈표 12〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림9)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1816	S1	0.1165	T1	0.2000
R2	0.1816	S2	0.1165	T2	0.2000
R3	0.1816	S3	0.1165	T3	0.2000
R4	0.1816	S4	0.1165	T4	0.2000

바. 상별 6개 케이블 사용 배치도(2)



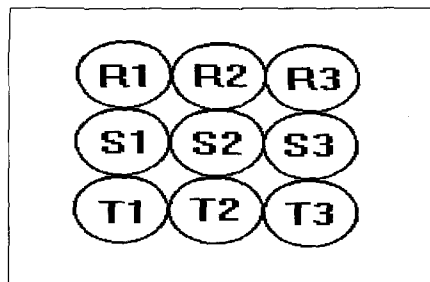
〈그림 8〉 상별 6개 케이블 배치(2)

〈표 11〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림8)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.2180	S1	0.0773	T1	0.1333
R2	0.3113	S2	0.0987	T2	0.1646
R3	0.2180	S3	0.0773	T3	0.1333
R4	0.3113	S4	0.0987	T4	0.1646
R5	0.3237	S5	0.1459	T5	0.1647
R6	0.3237	S6	0.1459	T6	0.1647

아. 상별 3개 케이블 사용 배치도

동일한 상에 3개씩 배치한 경우는 그림10이 가장 양호한 방법이지만 리액턴스 값의 차이가 일부 존재하여 약간의 전류 불평형은 발생한다.



〈그림 10〉 상별 3개 케이블 배치

〈표 13〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림10)

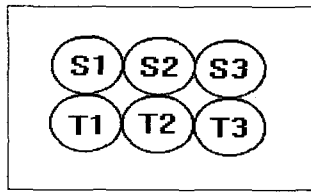
R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.2201	S1	0.0926	T1	0.1236
R2	0.2450	S2	0.0992	T2	0.1379
R3	0.2201	S3	0.0926	T3	0.1236

사. 상별 4개 케이블 사용 배치도

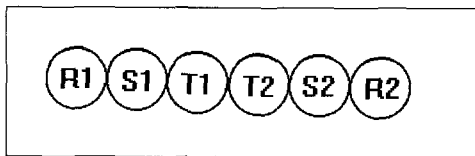
상별 4개의 케이블 배치 방안에 대하여 해석한 결과 그림 9와 같은 방안은 동일한 상에서 케이블간에 리액턴스 값이 동일하다는 것을 알 수 있었다.

### 자. 상별 2개 케이블 사용 배치도

상별 2개 케이블의 배치도 그림 11과 12 배치안이 배치안별 케이블의 리액턴스가 동일하게 나타난 것으로 양호한 결과를 얻었다. 따라서 이곳에서는 케이블의 배치안만 보인다.



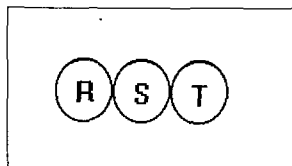
〈그림 11〉 케이블 2개 배치안(1)



〈그림 12〉 상별 케이블 2개 배치안(2)

### 차. 상별 1개 케이블 사용 배치도

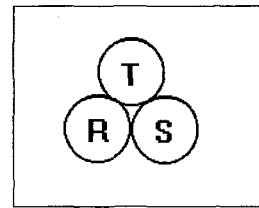
상별로 1개의 케이블을 사용하는 것은 동일한 상에서는 케이블이 한 개로 더 이상의 해석은 불필요하겠지만 각상에서 발생하는 리액턴스의 차이로 상 불평형 전류가 흐르게 된다. 참고로 현장에서 주로 많이 사용되고 있는 것으로 생각되는 그림 13의 수평 배치 방법과 그림 14의 삼각형 배치방법에서 알 수 있는 바와 같이 삼각형 배치 방법에서는 상의 리액턴스 크기가 전부 동일하여 상 전류도 동일해지는 것을 알 수 있다.



〈그림 13〉 배치안 (1)

〈표 14〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림13)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1652	S1	0.1328	T1	0.1652



〈그림 14〉 배치안(2)

〈표 15〉 상별/케이블별 리액턴스 해석결과(그림14)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스	케이블 번호	리액턴스
R1	0.1328	S1	0.1328	T1	0.1328

## 6. 배치안 변경과 시험

“A” 발전소에 대하여는 앞에서 언급한 바와 같이 상당 5개의 케이블로는 전류 평형을 위한 배치 방안을 얻을 수 없어 동일한 상에 6개의 케이블 배치 방안을 검토하게 되었으며 이 결과 그림 7의 배치 방안을 채택하게 되었다. 이를 위하여 케이블을 상당 1개씩을 추가하여 그림1과 같이 배치되어 있던 것을 그림7과 같이 재배치한 후 설비 운전 전에 우선 시험을 해 보았다. 시험 방법은 우선 변압기 1차측에 3상 440V를 연결하고 제어 정류기의 직류 출력을 단락시킨 후 제어 정류기의 사이리스터 게이트 신호를 변경시켜 전류를 흐르게 하였다. 시험 결과는 표 16과 17에 보인다. 표16은 변압기의 2차 단자전압의 변화를 보이고 있으며 표17은 시험시의 케이블별 전류분포를 보인다. 케이블에 흐르는 전류의 측정은 그 경향만을 알기 위한 것이었기 때문에



후크 온 미터를 이용하여 하나씩 하나씩 측정 한 자료이다.

〈표 16〉 변압기 2차 단자 전압 변화

구 분	R 상	S 상	T 상
무부하시 전압 V	11.02	11.02	11.04
부하시 전압 V	3.54	2.86	3.83

〈표 17〉 상별/케이블별 전류 분포(시험 자료)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)
R1	68.9	S1	76.5	T1	78.1
R2	78.1	S2	74.4	T2	76.3
R3	66.1	S3	79.5	T3	62.9
R4	57.8	S4	70.4	T4	55.6
R5	82.7	S5	81.6	T5	70.2
R6	66.0	S6	66.6	T6	81.6
계	419.6	계	449.0	계	424.7

표 17에서 알 수 있는 바와 같이 R상의 경우 케이블 중 최대전류와 최소전류비가 143.1%, S상의 경우 122.5%, 그리고 T상에서는 146.8%를 보이고 있어 양호함을 알 수 있다.

시험을 끝내고 실제통에서 부하운전을 실시한 결과는 표 18과 같으며 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 최대/최소 전류의 비는 R상이 135%, S상이 129%, 그리고 T상이 163%를 보이고 있어 허용 범

〈표 18〉 상별/케이블별 전류 분포(실부하 운전 자료)

R 상		S 상		T 상	
케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)	케이블 번호	전류(A)
R1	139.4	S1	147.7	T1	178.3
R2	165.7	S2	148.0	T2	161.9
R3	142.7	S3	158.1	T3	127.3
R4	126.7	S4	127.0	T4	112.0
R5	171.9	S5	155.8	T5	149.0
R6	140.9	S6	164.5	T6	183.2
계	887.3	계	901.1	계	911.7

위로 알려져 있는 150% 부근에 있음을 알 수 있다.

“B” 발전소에 대하여는 전류 불평형이 발생하지 않는 케이블 배치방식을 사용하도록 권고하였으며 재배치후의 전류는 측정해보지 못하여 이곳에 자료로 제시할 수 없음을 안타깝게 생각한다.

## 7. 결 론

케이블 상호간의 전자기적인 간섭을 균일하게 하기 위해서는 대칭적인 케이블 포설 방법이 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다. 짝수의 케이블 배치 경우에는 좌우 대칭이 되도록 케이블을 포설하는 것이 가장 바람직하며, 이때 각상의 케이블 개개의 리액턴스는 동일하나, 상간의 케이블 리액턴스는 차이가 발생한다. 상간 케이블의 리액턴스를 동일하게 하기 위해서는 각상의 중심거리가 동일하여야 가능하나, 각상에서 다수의 케이블을 사용하는 경우에는 상별 리액턴스를 동일하게 배치하게 되면 동일상의 케이블의 리액턴스에 차이가 발생하게 된다. 한가지 유일한 방법은 각 상당 하나의 케이블로 각 상의 중심거리가 같은 삼각형 배치방법을 적용하면 각 상의 리액턴스가 동일하게 되어 전류 평형을 가져올 수 있다. 이와 같이 리액턴스만을 계산하여 비교하는 것은 각 상에 사용된 케이블의 길이가 동일하여 저항이 동일하다는 가정하에 해석한 것이다. 그러나 실제로는 현장의 사정에 따라 케이블이 구부러지는 경우도 발생하게 되어 해석결과 저항이나 리액턴스에 일부 편차가 있을 수 있다. 실제 운전 상황에서는 부하를 점점 증가시켜 운전하게 되면 시간의 경과에 따라 전류 분포가 큰 케이블의 온도가 작은 케이블의 온도보다 상승하여 저항이 증가하게 되고 이로 인하여 임피던스가 증가됨에 따라 전류 불평형률이 개선됨을 확인할 수가 있었다. 예로 T상의 불평형률 163%가 전류가 증가함에 따라 150% 이하로 감소함을 확인하였다. ☒