

지중송전계통에서 시스순환전류 해석 및 저감방안

論 文

50A - 11 - 6

Analysis and Reduction Methods of Sheath Circulating Current in Underground Transmission Systems

鄭彩均* · 李鍾範** · 姜地原*** · 張太因***

(Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee · Ji-Won Kang · Tae-In Jang)

Abstract - This paper describes the analysis of sheath circulating current and various methods to reduce the large circulating current in case of operating cable system using EMTP/ATPDraw. And also, possible methods are proposed through a detailed analysis regarding cable systems by considering various electrical and environmental factors. It is evaluated that the proposed reduction methods can be effectively applied to reduce the large sheath circulating over current with the minimized electrical problems.

Key Words: Power cables, Sheath circulating current, Sheath induced voltage, EMTP/ATPDraw

1. 서 론

전력케이블에 전류가 흐르면 도체저항에 의한 손실, 유전체중에서 발생하는 손실 및 금속시스의 손실 등이 발생하는데, 특히 이중에서 시스 손실은 도체전류와의 전자유도현상에 따른 시스 상호간 및 시스와 대지간의 시스순환전류로 인해 발생하게 된다[1][2]. 또한 전력구나 관로를 이용하여 운용되고 있는 우리나라 지중송전계통은 케이블의 간격 및 높이의 고저차등을 유발시키고 있으며 지형적 구조 및 특성 차이로 인해 여러 가지 전기적 불균형 현상이 나타나고 있는데, 이는 도체와 타상 시스간 상호임피던스 및 시스 상호임피던스 등에 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고 있다. 시스순환전류가 상승하면 시스 손실 증가로 인해 케이블의 온도를 상승시켜 송전용량에 영향을 미치게 되고 심화 될 경우 인체에 영향을 미칠 뿐만 아니라 절연체나 방습층의 파괴로 인한 고장을 유발할 수도 있어 시스순환전류를 억제시켜야만 한다. 그러나 전력케이블계통의 이러한 문제를 해결하기 위한 이론적, 해석적 시도가 매우 미흡하여서 국내실정에 알맞는 적절한 방안을 도출시키지 못하고 있는 실정에 있다[3][4].

따라서, 본 논문에서는 실제 지중송전계통에서 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 실제계에 대해 EMTP/ATPDraw 및 계산식 등을 종합하여 시스순환전류를 해석하였고, 이로부터 시스순환전류의 특성을 다양하게 분석하였다 [5]-[8]. 특히 여기서도 선로 포설방식 및 상 배치에 의한 임피던스 변화에 따른 시스순환전류의 특성과 선로구간길이 및 부하전류, 접지저항 등이 시스순환전류에 미치는 영향 등을 다각적으로 분석하여 신설선로 적용방안은 물론 현재 문

제가 되고 있는 기설선로의 현실적 시스순환전류 저감 방안에 대해 구체적으로 제시하였다.

2. 지중송전계통 모델링 및 시스순환전류 계산

2.1 지중송전계통 모델링

본 논문에서 다루고 있는 한국전력공사 A S/S ~ B S/S 구간의 실제 지중송전계통 포설방식은 전력구식과 관로식이 혼용되어 있으며, 케이블도 154[kV] 1200[mm²] XLPE 와 OF 케이블이 함께 포설되어 있다. 또한 선로공장은 7.518[km]이고 보통접속함(NJ)과 절연접속함(IJ)를 포함해 총 26개의 접속함이 있는데, 그림 1은 시스순환전류가 상승하는 18번 접속함(IJ-18)까지의 케이블 접속형태 및 구간길이를 나타낸 것이다.

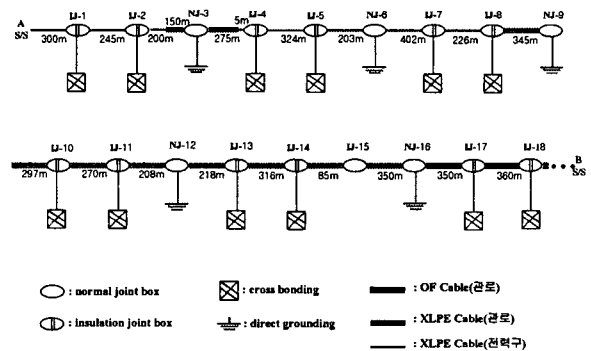


그림 1. 케이블의 접속형태 및 구간길이

Fig. 1 The types of cable connection and length of sections

그림 1에서 알 수 있듯이 NJ-16까지는 XLPE케이블로, 그 이후에는 OF케이블로 포설되어 있다. 또한 IJ-8까지는 전력구 방식으로 포설되어 있으나, 일부 IJ-2 ~ NJ-3의 150[m]와 NJ-3 ~ IJ-4의 275[m]의 구간은 관로식으로 포설이 되어 있고, IJ-8 이후에는 관로식으로 포설되어 있는 등 계통이 복잡하게 구성되어 있다. 여기서 시스 접지저항은 중단접속함에서의 직접접지는 지중선공사의 지침을 고려하여 1[Ω]으로 하였

* 準 會 員 : 圓 光 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

** 正 會 員 : 圓 光 大 電 氣 電 子 및 情 報 工 學 部 教 授 · 工 博

*** 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員

接 受 日 字 : 2001年 9月 25日

最 終 完 了 : 2001年 10月 30日

고, 보통접속함(NJ)에서의 직접접지는 10[Ω]으로 하였다.

2.2 시스순환전류 계산

시스순환전류를 계산하는 일반적인 계산식은 그림 2와 같은 지중송전계통의 크로스분딩 된 한 구간에서 식 (1)과 같이 표현된다[5].

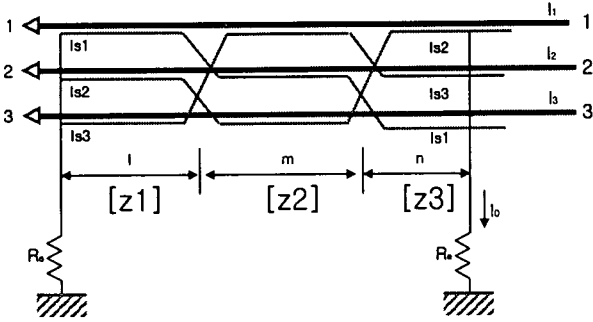


그림 2 지중송전계통 단면도

Fig. 2 Underground transmission system in a section

$$l \cdot [z1][Is1] + m \cdot [z2][Is2] + n \cdot [z3][Is3] + [Vs] + 2R_g \sum_{i=1}^n Is_i = 0 \quad (1)$$

- 여기서, l,m,n : 크로스분드 각 구간의 경간길이[km]
- [z1],[z2],[z3] : 각 구간에서의 케이블 시스 대지커패시턴스 행렬[Ω/km]
- [Isi] : 케이블 시스순환전류 행렬[A]
- [Vs] : 케이블 시스유기전압 행렬[V]
- Re : 접지저항[Ω]

3. 시스순환전류 특성분석

이 장에서는 시스순환전류에 대한 실측값과 계산값의 비교는 물론 계산식을 바탕으로 하여 시스순환전류의 특성을 다양하게 분석하여 제시하였다.

3.1 실측값과 계산값 비교

본 논문에서 다루고 있는 지중송전 계통에서 시스순환전류를 측정된 결과 대부분의 계산값과 실측값이 비슷한 경향의 값을 보이고 있는데 그 중 가장 큰 값을 보이고 있는 NJ-6에서의 시스순환전류를 비교하면 표 1과 같다. 이 표에서 보여지고 있는 약간의 오차 이유는 계산식에서 다루기 힘든 계통상의 여러 가지 복잡한 요소들의 영향으로 사료된다.

표 1. 실측값과 계산값의 비교

Table. 1 Comparison between measured and calculated values

NJ	상	실측값[A]	계산값[A]
NJ-6	A	117.78	126.57
	B	145.98	106.59
	C	124.45	123.09
	A+B+C	10.65	1.96

3.2 임피던스와 시스순환전류

케이블 시스 및 시스와 타상 도체간 상호임피던스는 케이블 도체 중심간격에 많은 영향을 받는다. 케이블 도체 중심점간의 거리는 케이블의 배치, 즉 케이블 포설 형태에 따라 달라지며 이는 상호 임피던스에 직접적인 영향을 주어 포설 방식이 전력구 방식에서 관로식으로 바뀌는 구간에서는 상호임피던스의 불평형이 발생하게 된다.

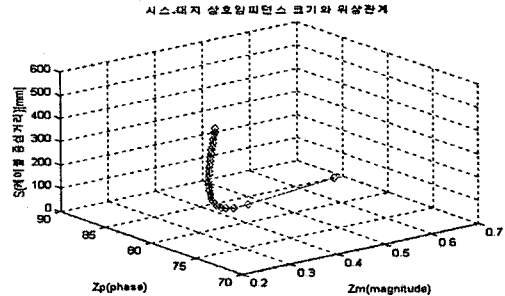


그림 3. 케이블 중심점간의 거리 변화에 따른 시스 상호임피던스의 크기와 위상비교

Fig. 3 Relation of the amplitude of mutual sheath impedance and the phase with the different length between cable conductors

그림 3은 케이블 중심간격이 시스 상호 임피던스에 미치는 영향을 분석하기 위해 케이블 도체 중심점간의 거리가 증가함에 따라 변화하는 임피던스의 특성을 나타내었다. 그림에서처럼 중심점간의 거리가 증가 할 수록 상호 임피던스의 크기 및 위상은 감소하는 특성을 나타내고 있다.

다음은 임피던스의 변화에 따른 시스순환전류가 변화하는 특성을 분석하기 위해 그림 4에서처럼 관로식으로 포설된 케이블의 보통접속함(NJ) 사이에서 교락 비접지 방식으로 크로스분딩 되어 있는 한 구간의 IJ-c와 NJ-d의 접속함은 일정하고 IJ-b 접속함의 케이블 도체중심점 간의 거리를 변화하였을 때 시스순환전류 분석하였다. 도체 중심점간의 거리변화에 따른 특성 분석을 위해 접속함 간의 거리는 300[m]로 일정하게 하였으며 부하전류는 실제계통 전류인 320[A]로 하였다.

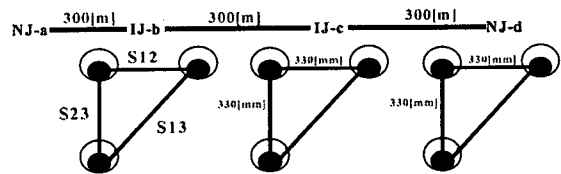


그림 4. 케이블 배열형태(관로식)

Fig. 4 Type of cable array(duct)

그림 5는 그림 4의 S12와 S13가 각각 100[mm]에서 500[mm]까지 변화할 때 각 상의 시스순환전류를 크기와 위상으로 나타낸 것이다. 그림 5 좌측은 S12가 변화할 때 A 상 시스전류(is1)와 B상의 전류(is2)는 시스 순환 전류가 최대 65[A]에서 거리가 증가할수록 감소하다가 다른 접속함(IJ-c, NJ-d)과 같은 거리가 되는 330[mm]지점에서 가장 낮은 값을 보인 후 다시 서서히 증가하는 특성을 나타내고 있다. 또한 그림 5 우측은 S13가 변화 할 때는 시스 A상 전류

(is1)와 C상 전류(is3)가 최대 85[A]에서 거리가 증가할수록 감소하다가 다른 접속함(IJ-c, NJ-d)과 같은 거리가 되는 470[mm]지점에서 가장 낮은 값을 보였다. 따라서 접속함 간의 구간길이가 일정할 때 케이블 선로의 일정한 배치를 통해 순환전류를 저감시킬 수 있음을 보였다.

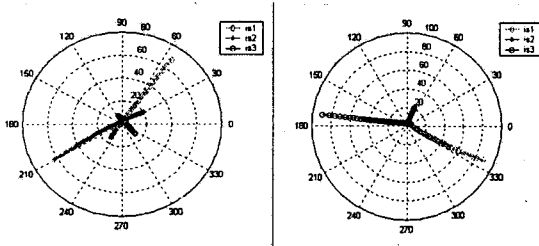


그림 5. S12 및 S13가 변화할 때 시스순환전류
Fig. 5 Sheath circulating current with change of S12 and S13

또한 실제통에서의 변환 특성을 분석하기 위해 가장 높은 시스순환전류가 측정된 NJ-3과 NJ-6사이의 선로 데이터를 이용해 관로식 구간에서 케이블 도체 중심점간의 거리가 변화할 때 시스순환전류를 분석하였다. 그림 6에서는 NJ-3과 NJ-6사이의 선로배치 및 구간길이를 나타내었다.

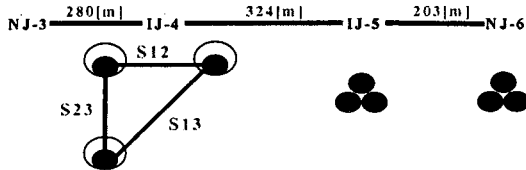


그림 6. 케이블의 배열형태(관로식 + 전력구식)
Fig. 6 Type of cable array(duct and pipe)

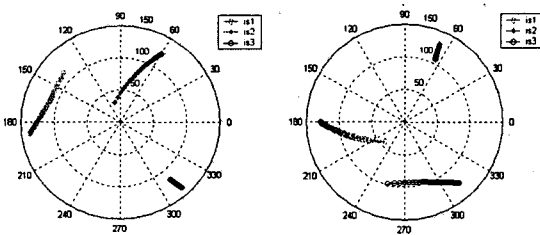


그림 7. S12 및 S13가 변화할 때 시스순환전류
Fig. 7 Sheath circulating current with change of S12 and S13

그림 7에서는 그림 6의 S12와 S13가 각각 100[mm]에서 500[mm]까지 변화할 때 각 상의 시스순환전류를 크기와 위상으로 나타낸 것이다. 그림 7 좌측은 S12가 변화할 때의 경우로 A상 시스전류(is1)의 크기는 120[A]에서 서서히 감소하다가 최대 140[A]까지 증가하는 특성을 보이고, 위상은 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 B상의 시스전류(is2)는 위상의 변화에 비해 크기가 급격히 변화하고 있다. 한편 우측은 S13가 변화할 때의 경우로 A상 시스전류(is1) 크기는 위상에 비해 급격히 변화하는 반면 C상 시스전류(is3)는 크기는 서서히 변화하나 위상은 급격히 증가하고 있다.

그림 5와 그림 7의 특성을 비교해보면 시스순환전류 크기

는 최대값을 기준으로 그림 7이 매우 높으며, 그림 5에서는 케이블 도체 중심점간의 거리가 증가할 수록 순환전류는 감소하는 특성을 보이나, 그림 7에서는 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이러한 결과로 볼 때 케이블의 균형적 포설 및 배치는 임피던스의 영향을 줄여 시스순환전류를 저감시킬 수 있다. 따라서 그림 6과 같은 선로배치에서 시스순환전류가 상승하는 이유는 선로배치의 불균형으로 인한 시스 상호임피던스의 불평형과 선로구간길이 때문으로 사료된다. 그래서 다음으로 접속함간 선로구간길이와 시스순환전류의 관계에 대해 분석하였다.

3.3 선로구간길이와 시스순환전류

이 절에서는 선로 구간길이와 시스순환전류의 관계를 분석 하였다. 그림 8은 동일한 삼각배열형태의 전력구로 포설되어있는 케이블에서 모든 구간(l,m,n) 길이가 300[m]로 동일할 때 각각 한 구간을 변화시킬 경우 시스순환전류의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 보이는 바와 같이 선로배치가 균일한 상태에서 선로구간길이가 모두 등가적으로 구성되어 있으면 시스순환전류는 영이 됨을 알 수 있었다.

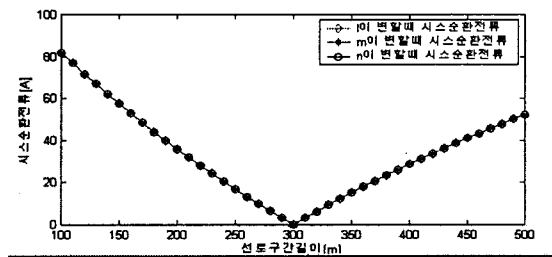


그림 8. 구간길이 변화에 따른 시스순환전류
Fig. 8 Sheath circulating current with change of section length

그림 9에서는 전력구 방식의 삼각배열형태로 포설되어 있고 실제통의 A S/S ~ NJ-3 구간의 접속함간 거리인 l = 300[m], m = 245[m], n = 350[m]인 경우 각각 한 구간의 길이가 변화할 때 시스순환전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시스순환전류는 선로의 등가길이가 가까운 250[m] ~ 350[m] 사이에서 가장 낮은 값을 보였다.

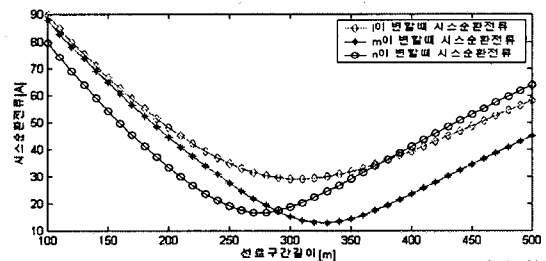


그림 9. 구간 길이의 변화에 따른 시스순환전류
Fig. 9 Sheath circulating current with change of section length

그리고 관로식과 전력구식이 혼용되어 있는 그림 6의 실제통 구간을 이용해 NJ-3과 NJ-6 사이의 선로 구간길이가 변할 때 각 상의 시스순환전류를 분석하였다. 지면상 생략하였으나, 시스순환전류는 구간길이의 증가에 반비례하여 감

소하는 형태를 보여 선로구간길이가 증가적으로 구성되어 있는 계통에 비해 영향은 적게 나타남을 알 수 있었다.

따라서 선로구간길이의 시스순환전류의 관계로 볼 때 케이블 배열이 불균형인 상태에서도 선로길이를 조정함으로써 순환전류는 약간의 저감효과를 볼 수 있으나, 케이블 배열이 일정한 상태에서 선로구간길이를 증가적으로 맞추어 주면 순환전류는 급격히 감소함을 알 수 있었다.

4. 사례연구

본 논문에서는 시스순환전류의 과다로 현재 문제가 되고 있는 실제계통에서 시스순환전류를 저감시키기 위해 우선 시스순환전류의 특성에 대한 다양한 분석을 하고 이러한 분석 결과를 기초로 하여 EMTP/ATPDraw를 이용하여 사례별로 상세히 시뮬레이션 함으로써 시스순환전류의 증가 원인을 파악함은 물론 실제적인 저감대책의 수립과 차기 신설선로의 공사를 위한 자료를 제시하고자 한다. 표 2는 사례별 연구의 예를 나타낸 것이다.

표 2. 사례연구의 예
Table. 2 The example of case study

사 례 1	실계통 모델링
사 례 2	IJ-2~NJ-3, NJ-3~IJ-4 구간을 관로에서 전력구로 변환
사 례 3	IJ-1~NJ-16 구간을 모두 전력구로 변환
사 례 4	사례 1의 접속함간의 포설길이를 모두 300[m]로 변환
사 례 5	사례 3의 포설길이를 모두 300[m]로 변환

4.1 사례 1의 시뮬레이션 결과와 실측치와의 비교

그림 10은 사례 1인 실제계통을 대상으로 시뮬레이션하여 얻은 상별 시스순환전류를 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 NJ-6에서 최대값을 보였으며 IJ-4 ~ NJ-9 구간 사이에서 상승함을 알 수 있었다.

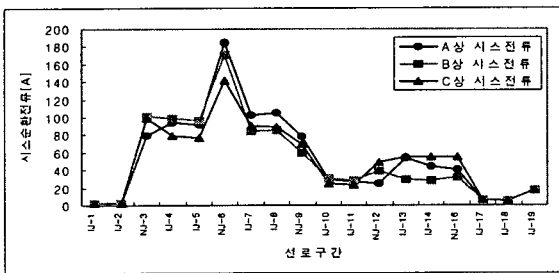


그림 10. 사례 1의 상별 시스순환전류
Fig. 10 Sheath circulating current of each phase in case 1

실제로 실측값이 있는 표 1에서와 같이 NJ-6에서 가장 높은 값을 보였다. NJ-3 ~ NJ-9까지의 선로는 전력구식과 관로식이 혼용되어 있는 구간으로 시스 상호임피던스 및 도체와 타상 시스간 상호임피던스가 불안정해지며 이로 인한 임피던스의 변화와 접속함간의 길이의 불균형으로 시스순환전류가 상승하고 있음을 원인으로 들 수 있다. 특히 NJ-6에서는 NJ-3~IJ-4, IJ-8~NJ-9의 관로식 포설로 인한 임피

던스 변화 요인에 의한 영향을 동시에 받고 있으며 접속함 간 길이가 불균형이어서 시스순환전류가 가장 상승하고 있는 것으로 사료된다. 또한 NJ-9 이후에는 모두 관로식으로 일정하게 포설되어 있어 시스순환전류가 점차 안정적으로 유지되고 있다.

따라서 본 논문에서는 시스순환전류가 상승하는 IJ-4와 NJ-9사이의 값을 실측하여 실제계통 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 11~그림 13은 각 상별로 IJ-4와 NJ-9사이의 실측치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 실측치와 시뮬레이션 값은 서로 같은 유형으로 변화하고 있으며 실제 모델링에서 적용 할 수 없는 포설된 케이블의 격임현상과 도면과 일치하지 않은 상별 간격 등 여러가지 계통 주변의 환경적인 영향을 감안한다면 실측치와 시뮬레이션 값은 상당히 일치하는 것으로 평가되어 본 논문의 시뮬레이션 방법 및 결과는 상당히 정확성이 있다고 사료된다.

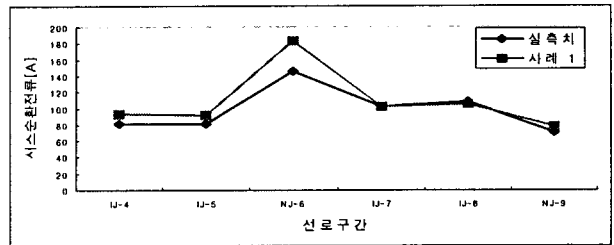


그림 11. 실측치와 시뮬레이션 값과의 비교(A상)
Fig. 11 Comparison between measured and simulated value(phase A)

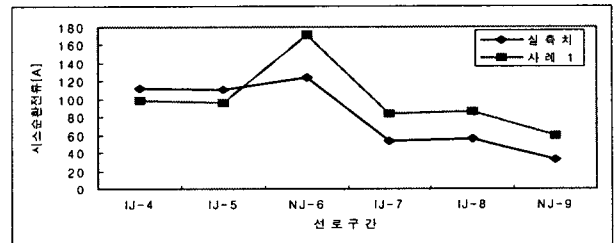


그림 12. 실측치와 시뮬레이션 값과의 비교(B상)
Fig. 12 Comparison between measured and simulated value(phase B)

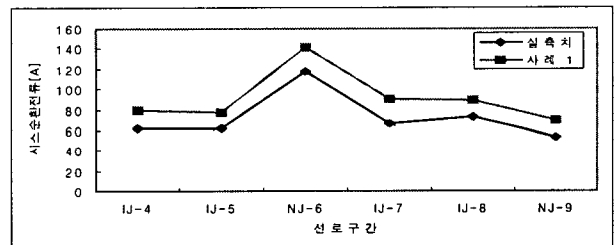


그림 13. 실측치와 시뮬레이션 값과의 비교(C상)
Fig. 13 Comparison between measured and simulated value(phase C)

4.2 사례 2와 사례 3 비교

사례 2와 사례 3에서 제시한 케이블 포설 방법을 변환하여 시뮬레이션한 결과를 사례 1의 결과와 비교하였다. 사례

2와 사례 3은 상호임피던스를 조정하였을 때 시스순환전류의 저감효과를 검증하기 위해 관로식으로 포설된 구간을 전력구식으로 변환하였다.

그림 14는 사례 1, 사례 2, 사례 3 각 상의 시스순환전류를 비교한 그림 중 A상만을 보여주고 있다. 사례 2는 IJ-2~NJ-3, NJ-3~IJ-4 구간을 관로식에서 전력구식으로 변환한 형태로 NJ-6의 보통접속함(NJ)까지는 시스순환전류가 저감하나 그 이후에는 영향을 못 미쳐 사례 1과 같은 결과를 보이고 있다. 이러한 결과를 볼 때 전력구식 포설형태에 한 구간을 관로식으로 포설 했을 때 이는 3.2절에서 분석한 대로 임피던스에 의한 영향이 시스순환전류의 상승원인으로 작용하고 있음과 같은 결과임을 알 수 있다. 또한 NJ-6 이후 선로에 영향이 없는 이유는 시스순환전류는 보통접속함의 직접접지 지점으로 일부 빠져나가나 대부분은 크로스분당된 2 구간의 보통접속함 사이에서만 순환하기 때문이다.

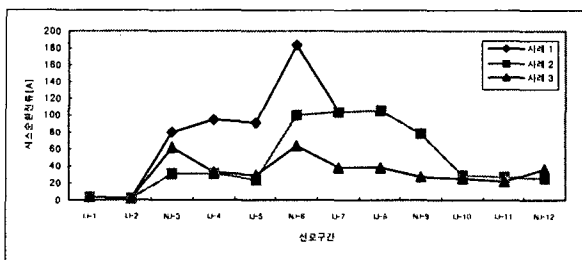


그림 14. 사례별 시스순환전류 비교(A상)
Fig. 14 Comparison of sheath circulating current in case studies (phase A)

사례 3은 IJ-1~NJ-16 구간을 모두 전력구식으로 변환하여 시뮬레이션 하였다. 그림 14에서 알 수 있듯이 모든 구간에서 사례 1에 비해 시스순환전류가 저감되었고, 특히 사례 2에서와는 달리 NJ-6 이후에도 시스순환전류는 저감되었다. 또한 NJ-9 이후에는 모든 구간이 관로식으로 포설되어 있는 구간으로 이 구간에서의 저감효과는 적었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 논문에서는 포설 방법을 일정히 함으로써 시스순환전류를 저감할 수 있음을 입증하였다. 또한 크로스분당 사이의 보통접속함에서 순환하는 시스순환전류는 해당 구간에서 주로 영향을 미치며 해당 구간을 벗어나면 영향이 적음을 알 수 있었다. 따라서 시스순환전류는 케이블 계통의 모든 구간에서 상승하지 않고 본 논문에서 모델링한 선로처럼 관로식과 전력구식을 혼용하여 포설된 구간이나 접속함 간의 거리의 불균형이 심한 구간 등에서 주로 상승하게 됨을 알 수 있다.

4.3 사례 4와 사례 5 비교

사례 4와 사례 5에서 제시한 접속함간의 구간길이를 변환하여 시뮬레이션한 결과를 사례 1의 결과와 비교하였다.

그림 15는 사례 1, 사례 4, 사례 5의 A상 시스순환전류를 비교하여 보인 것이다. 사례 4는 실제계통인 사례 1의 접속함간의 포설 길이를 모두 300[m]로 일정하게 변환하여 시뮬레이션 하였으나 그림에서 보인 것처럼 시스순환전류의 저감효과는 크지 못하였다. 따라서 선로의 배열을 혼용한 상태에서 선로 구간길이만 등가적으로 맞추어 주는 것은 순환전

류의 저감효과가 거의 없음을 증명하였다.

반면에 사례 3의 포설 길이를 모두 일정하게 300[m]로 변환시킨 사례 5의 시뮬레이션 결과는 최대 5[A] 이하로서 사례 1과 비교해 97[%]의 저감효과를 보여 저감 효과가 매우 높았다. 이는 3.3절에서 분석한 대로 선로의 배열을 일정하게 유지하면서 선로 구간길이를 모두 등가적으로 구성하면 시스순환전류는 영에 가깝도록 저감된다는 특성을 입증한 것이다.

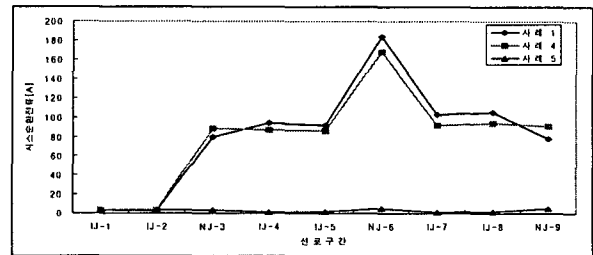


그림 15. 사례별 시스순환전류 비교(A상)
Fig. 15 Comparison of sheath circulating current in case studies (phase A)

지금까지의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 선로 포설 과정에서 전력구식과 관로식의 혼용은 시스순환전류 상승의 가장 큰 원인으로 작용하고 있다. 또한 시스순환전류는 사례 3에서처럼 선로의 배열을 일정하게 유지시키면 상승하는 것을 방지 할 수 있었다. 그러나 사례 5처럼 등가 선간길이를 유지하면서 선로의 배열을 일정하게 유지하면 시스순환전류 저감효과는 사례 3의 저감효과에 비해 더욱 우수하다는 것을 알 수 있었다. 다만 사례 4의 경우처럼 선로 구간길이만 등가적으로 맞추어 줄 경우에는 시스순환전류의 저감 효과는 높지 않았다.

5. 시스순환전류 저감방안

5.1. 신설선로 적용방안

지금까지 우리 나라 전력케이블의 포설은 체계적인 연구를 바탕으로 시스템을 구성했다기 보다는 지리적 특성 등 여러 가지 포설 환경에만 치중해 시공 해왔던 것이 사실이다. 따라서 본 논문에서 대상으로 하는 지중송전계통 뿐만 아니라 다른 계통에서도 시스순환전류의 상승으로 인한 피해가 우려되고 있는 실정인어서 케이블 시스의 온도상승으로 인한 절연파괴를 유발시키고 송전용량을 저하시키며 선로보수원에게는 신체접촉에 의하여 감전 등 피해를 줄 수 있는 시스순환전류상승에 대한 저감대책 수립은 시급하다고 하겠다.

이 장에서는 4장에서 제시한 사례를 근거로 앞으로 신설되는 지중송전계통에서의 시스순환전류 저감방안을 제시하고자 한다. 전력케이블은 특성상 한번 포설하면 계통을 전체적으로 바꾸는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 사례별 연구를 통한 저감 대책은 앞으로 신설되는 선로에 대해 적절한 기본자료로 사용될 것이다.

그림 16은 각 사례별 시스순환전류를 비교한 것이다. 또한 그림 17에서는 가장 높은 시스전류 값을 보이는 NJ-6의 최대 값을 기준으로 사례 1의 시스순환전류를 100[%]로 하

였을 때 각 사례별 저감순서를 나타낸 것이다. 시스순환전류 저감순서는 사례 1, 사례 4, 사례 2, 사례 3, 사례 5의 순이며 사례 3의 경우 34.1[%]까지 시스순환전류가 저감되어 66[%]의 저감효과를 보였으며 가장 낮은 시스 전류 값을 보이는 사례 5의 경우에는 2.73[%]까지 전류가 저감되어 97[%]의 높은 저감효과를 보였다. 따라서 선로의 배열을 일정하게 함으로써 66[%]의 저감효과를 보였으며 이 선로에 접속함간의 길이까지 일정하게 맞추어 주면 97[%]로 그 저감효과는 더욱 증가하였다. 다만 접속함간의 길이만 일정하게 맞추어 줄 때에는 저감효과가 8.5[%]로 높지 않았다.

본 논문에서의 이러한 결과를 근거로 전력케이블 신설시 시스순환전류 저감 방안으로 사례 3과 사례 5의 경우처럼 케이블의 배열을 모든 구간에서 관로식 혹은 전력구식으로 균일하게 유지할 것을 적극 권장하며 가능한 한 사례 5의 경우처럼 접속함간의 거리도 일정하게 유지할 것을 시스순환전류 저감방안으로 제시한다.

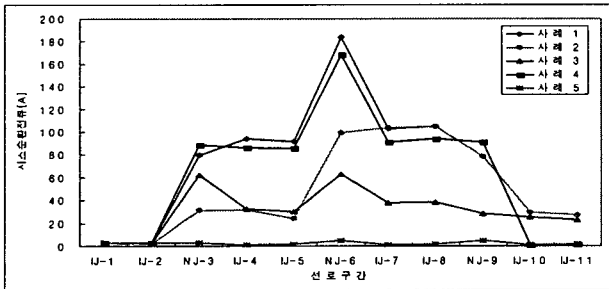


그림 16. 사례별 시스순환전류 비교
Fig. 16 Comparison of sheath circulating current in case studies

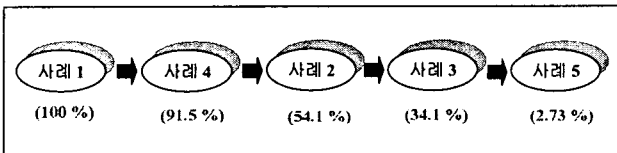


그림 17. 사례별 시스순환전류 저감 순서
Fig. 17 Reduction rank of sheath circulating current of case studies

5.2. 기설선로 적용방안

5.1절에서 기술한 신설선로 적용방안은 시스템 전체의 구성을 변경해야 되므로 이미 포설되어 있는 기설선로에서는 현실적으로 적용하기 힘들다. 그래서 본 논문에서는 기설선로에 적용 가능한 현실적인 시스순환전류 저감방안을 연구하여 제시하고자 한다. 본 절에서는 표 3에서 제안한 기설

표 3. 기설선로 적용방안의 예
Table. 3 Example of application method for pre-installed cable

제 1 방안	NJ-6 지점의 변경을 통한 선로길이 조정
제 2 방안	각 보통접속함(NJ)의 접지저항 변경
제 3 방안	전력구식으로 포설된 구간의 각 상별 케이블간 표면 이격거리 변경
제 4 방안	절연접속함(IJ)의 크로스본드 리드선에 저항삽입

선로의 현장적용이 가능한 4가지 방안에 대한 시뮬레이션 결과와 실측치와의 비교에서 정확성이 입증된 사례 1과 비교하여 시스순환전류 저감효과를 입증하고자 한다.

5.2.1 제 1 방안

제 1방안은 가장 높은 시스순환전류의 값을 보이는 NJ-6 지점의 보통접속함(NJ)의 위치를 조정하는 방안으로서 기존의 NJ-6은 직접 접속하고 거리를 적절히 조정후 직접접지가 이루어지는 NJ를 신설하는 방식이다. 본 방안에서는 IJ-5와 NJ-6간의 길이는 203[m]인 반면 NJ-6과 IJ-7의 길이는 402[m]로 상대적으로 길다는 것을 이용하여 표 4에서 제시한 대로 NJ-6의 위치를 변경하면서 접속함간의 거리를 조정하는 것이다.

표 4. 제 1방안
Table. 4 Method 1

Type	IJ-5 ~ NJ-6의 거리	NJ-6 ~ IJ-7의 거리
1-1	350[m]	255[m]
1-2	300[m]	305[m]
1-3	402[m]	203[m]

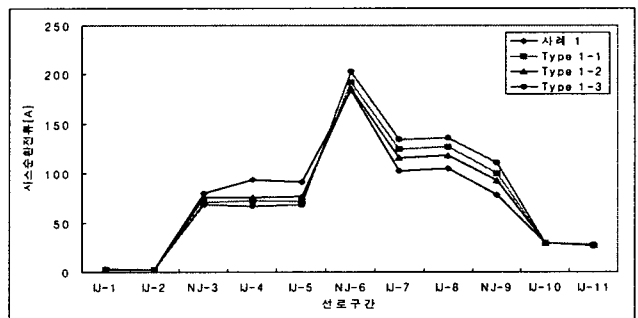


그림 18. 사례 1과 제 1방안의 Type별 시스순환전류 비교
Fig. 18 Comparison between case 1 and method 1 in each type

그림 18에서는 4장의 사례 1과 표 4의 Type별로 비교한 시스순환전류이다. 그림에서 알 수 있듯이 시스순환전류는 NJ-6 이전에서는 사례 1과 비교하여 거리 조정을 통해 약간 감소하였으나 오히려 그 이후 선로에는 증가하는 경향을 보였다. 따라서 제 1방안으로 제안된 NJ-6의 위치변경을 통한 선로길이를 조정하는 방법은 시스순환전류 저감방안으로 적절하지 못함을 알 수 있다.

5.2.2 제 2 방안

제 2방안은 보통접속함(NJ)의 직접접지 저항을 변경하는 방안으로 현장에서 저감대책으로 쉽게 생각할 수 있는 부분이기도 하다. 따라서 본 논문에서는 접지저항과 시스순환전류와의 관계를 상세히 분석하였다. 표 5는 제 2방안의 적용 방법에 대해 나열한 것이다.

표 5. 제 2 방안
Table. 5 Method 2

Type	적 용 방 안
2-1	NJ-6의 접지저항 변경
2-2	모든 NJ에서의 접지저항 변경

제 2방안의 Type 2-1의 NJ-6의 접지저항을 1[Ω]에서 100[Ω]까지 변화시켰을 때 시스순환전류와 그림 19처럼 Type 2-2의 모든 보통접속함(NJ)의 접지저항을 1[Ω]에서 100[Ω]까지 변화시켰을 때의 시스순환전류는 모두 사례 1과 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과를 볼 때 접지저항은 시스순환전류 저감에 영향을 미치지 못함을 검증하였다. 이는 접지점을 통해 대지로 직접 흘러 나가는 영상분 전류는 실측치와 시뮬레이션 결과를 통해서도 알 수 있듯이 미소한 양이며 대부분의 시스 전류는 크로스분당 되어 있는 두 구간 사이인 양쪽 보통 접속함(NJ) 사이에서 순환하기 때문으로 평가된다.

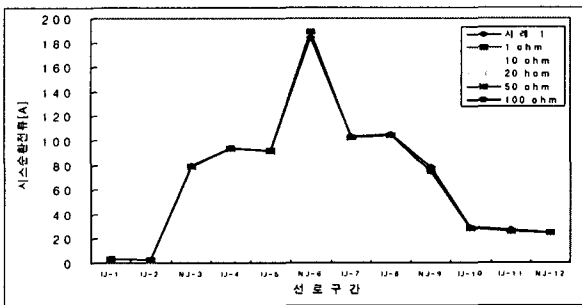


그림 19. 사례 1과 Type 2-2의 접지저항별 비교
Fig. 19 Comparison between case 1 and type 2-2 in different grounding resistances

5.2.3 제 3 방안

제 3방안은 IJ-8까지 전력구식으로 포설된 구간의 케이블 상간 배열을 그림 20에서 나타난 것처럼 변화를 주는 방안이다. 이 방안은 관로식과 혼용된 계통의 특성상 기존의 삼각배열 형태에서 발생하는 시스 상호임피던스의 불평형으로 인한 시스순환전류의 상승 요인을 최소화시키기 위한 방안으로서 표 6에서 제시한 것처럼 각각 50[mm], 100[mm], 200[mm], 300[mm]로 상간 이격거리를 변경하였을 때 시스순환전류의 저감 효과를 검증하였다.

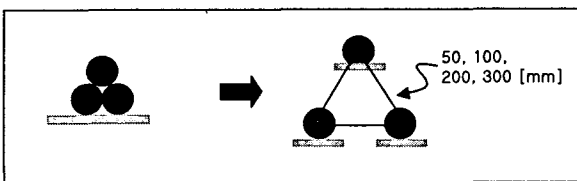


그림 20. 제 3방안 적용모델
Fig. 20 Applied model for method 3

표 6. 제 3방안
Table. 6 Method 3

Type	케이블 상간 표면 이격거리
3-1	50[mm]
3-2	100[mm]
3-3	200[mm]
3-4	300[mm]

그림 21에서는 사례 1과 제 3방안의 Type별 시스순환전류 값을 보여주고 있다. 그림에서처럼 관로식의 상간 케이블 도체 중심점간의 거리인 330[mm]에 가까워질수록 시스순환전류는 점점 저감하고 있다. 한편, 그림 22는 시스순환

전류의 최대점인 NJ-6에서 측정된 값을 기준으로 분석한 시스순환전류 저감 순서이다. 이 저감순서에서도 알 수 있듯이 50[mm]의 간격을 유지하였을 때는 사례 1의 시스 전류를 100[%]로 하였을 때 63[%]의 전류 값을 보여 37[%]의 저감효과를 나타내었으나 상간 표면 이격거리가 길어질 수록 시스 상호 임피던스의 불균형 현상이 해소되면서 시스순환전류는 계속 저감하다가 300[mm]의 간격으로 이격 하였을 때의 전류는 36.9[%]로 63.1[%]의 비교적 높은 저감효과를 나타내었다.

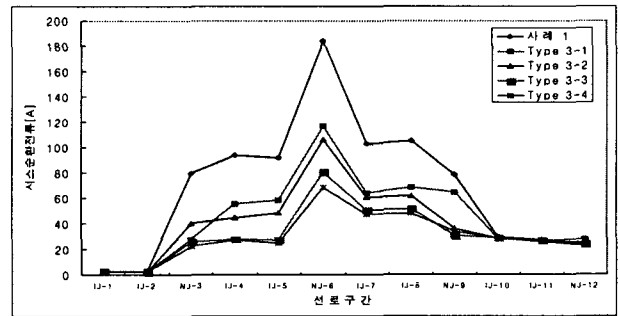


그림 21. 사례 1과 제 3방안의 시스순환전류 비교
Fig. 21 Comparison of sheath circulating current in case 1 and method 3

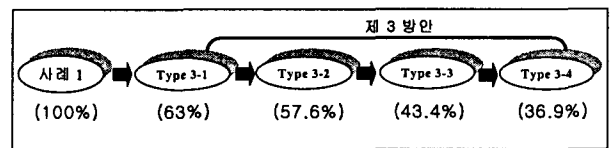


그림 22. 제 3방안의 시스순환전류 저감순위
Fig. 22 Reduction rank of sheath circulating current in method 3

또한 상간 이격거리를 늘리므로 변화하는 시스유기전압을 측정할 결과 시스유기전압의 최대 값은 Type 3-4일 때 21[V]로 이는 기준값인 50[V] 이하이므로 시스유기전압 면에서도 안정적이었다.

이 방안은 관로식과 혼용된 구간에서 시스 상호임피던스의 영향을 최소화함으로써 시스순환전류의 상승원인을 제거하여 최대 63.1[%]의 저감효과를 보였으며 시스유기전압도 기준치 이하임을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 기설 선로의 시스순환전류 저감 방안으로 제 3방안으로 제시된 전력구로 포설된 구간의 표면 이격거리를 Type 3-4처럼 300[mm]로 변경하는 것도 방안 중의 하나로 고려할 수 있다고 사료된다.

5.2.4 제 4방안

제 4방안으로 시스순환전류가 상승되는 구간의 절연접속함(IJ)의 크로스분드 리드선에 저항을 삽입하는 방안을 제시한다. 이 방안은 시스순환전류가 상승하는 절연접속함(IJ)의 구간의 시스 전류의 순환경로인 크로스분드 리드선에 저항을 삽입하여 시스순환전류를 저감시키는 방안으로서 저항을 삽입함에 따라 시스유기전압은 상대적으로 높아지지만 기준값 이하가 되며 상대적으로 전류를 저감시키는 효과가 있다. 표 7은 제 4방안의 적용 예를 나타낸 것이다.

표 7. 제 4방안
Table. 7 Method 4

Type	적 용 방 안
4-1	IJ-4, IJ-5의 크로스본드 리드선에 저항 삽입
4-2	IJ-5, IJ-7의 크로스본드 리드선에 저항 삽입
4-3	IJ-4, IJ-5, IJ-7, IJ-8의 크로스본드 리드선에 저항 삽입

그림 23은 가장 높은 시스순환전류를 보이는 NJ-6 전 구간인 IJ-4, IJ-5의 크로스본드 리드선에 각각 1[Ω], 5[Ω], 10[Ω]의 저항을 삽입하였을 때의 시스순환전류를 사례 1의 경우와 비교한 것이다. 그림에서처럼 저항이 삽입된 구간에는 5[A]로 저감효과는 매우 좋았지만 그 이후 구간에는 저감효과가 저하되고 있으며 저항별 차이는 크게 나타나지 않았다.

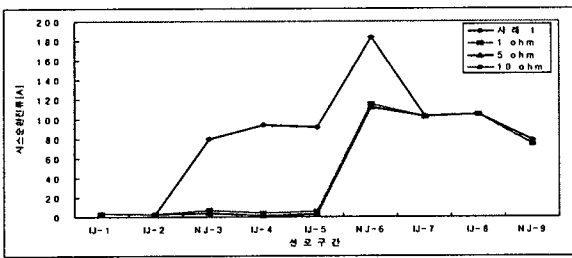


그림 23. 사례 1과 Type 4-1의 시스순환전류 비교
Fig. 23 Comparison of sheath circulation current in case 1 and type 4-1

그림 24는 NJ-6 전후의 한 구간인 IJ-5와 IJ-7의 크로스본드 리드선에 1[Ω]의 저항을 삽입하였을 때의 그림이다. 전체적으로 저감효과는 매우 좋으며 NJ-6에서는 20[A]가 측정되어 사례 1과 비교하여 89[%]의 높은 저감효과를 보였다. 또한 그림 26에서처럼 시스유기전압도 기준값인 50[V]이하를 보여 안정적인 것으로 판명되었다. 따라서 본 논문에서는 시스순환전류가 순환하는 한 구간의 크로스본드 리드선에 저항을 삽입 할 경우 시스순환전류의 저감 효과는 우수하다는 것을 입증하였으며 시스유기전압도 기준값 이하임을 입증했다.

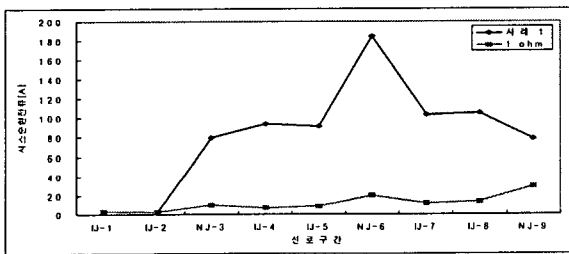


그림 24. 사례 1과 Type 4-2의 시스순환전류 비교
Fig. 24 Comparison of sheath circulating current in case 1 and type 4-2

그림 25는 NJ-6 전후의 두 구간인 IJ-4와 IJ-5, 그리고 IJ-7과 IJ-8에 각각 저항을 삽입하였을 때의 시스순환전류이다. 그림에서처럼 저감효과는 가장 우수하게 나타났으며 NJ-6 지점의 시스 전류는 1[Ω]일 경우 11[A]로 측정되어

94[%]의 저감효과를 보였다. 또한 시스유기전압도 그림 26에서처럼 가장 높을 것으로 예상되었던 10[Ω]의 경우에서도 18[V]로 기준값에 못 미치는 전압으로 안정적이었다.

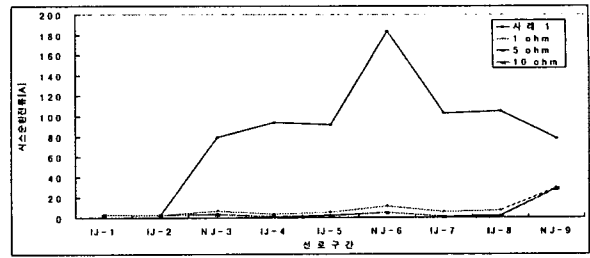


그림 25. 사례 1과 Type 4-3의 시스순환전류 비교
Fig. 25 Comparison of sheath circulating current in case 1 and type 4-3

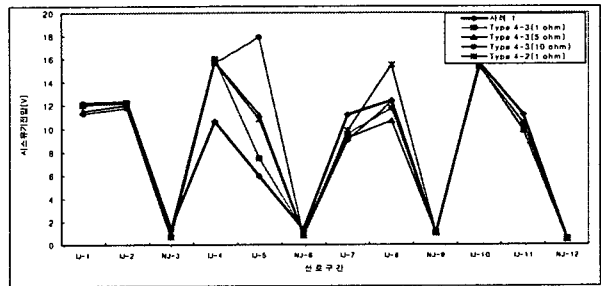


그림 26. 사례 1과 제 4방안의 시스유기전압 비교
Fig. 26 Comparison of sheath induced voltage in case 1 and method 4

따라서 제 4방안인 크로스본드 리드선에 저항을 삽입하여 시스순환전류를 저감하는 방안을 검토한 결과 시스유기전압도 안정적일 뿐만 아니라 그림 27에 나타낸 것처럼 시스순환전류의 저감효과도 매우 높다고 판단되어 본 논문에서는 크로스본드 리드선에 저항 등 임피던스 성분을 삽입하여 시스순환전류를 저감하는 방안도 기설선로의 시스순환전류 저감대책의 하나로 고려될 수 있을 것으로 사료된다.

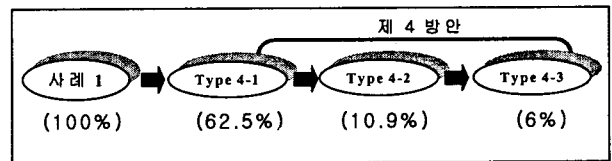


그림 27. 제 4방안의 시스순환전류 저감순위
Fig. 27 Reduction rank of sheath circulating current in method 4

시스순환전류 상승의 주요원인은 계통의 불안정한 구성에 있다. 그래서 기설선로의 경우 시스순환전류를 저감하는 것은 신설선로에 비해 매우 어려운 것이 사실이다. 따라서 논문에서는 기설선로 시스순환전류 저감대책으로 표 3의 4가지 방안을 제안하여 검토하였다. 검토 결과 제 1방안과 2방안은 시스순환전류의 저감효과가 없음을 확인하였고, 반면 제 3방안과 4방안의 저감효과는 매우 높은 것으로 평가되어 이를 시스순환전류의 실제적인 저감방안으로 제시한다.

또한 본 연구진은 제 4방안의 실증적인 시험을 위해 시스

유기전압 상승 및 저항체에서 소비되는 에너지양을 고려하여 리액턴스 성분도 있는 임피던스 성분의 저항체 개발을 위해 계속적인 연구를 진행하고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 시스순환전류가 상승하여 문제가 되고 있는 실선로에서 실측한 시스순환전류 값과 실 계통을 모델링(사례 1)하여 얻어낸 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이션의 정확성을 입증하였고 시스순환전류의 특성 분석을 통한 저감방안에 대해 제시하였다. 본 논문에서 분석한 내용과 저감방안을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선로 배열의 혼용(전력구식 + 관로식)은 시스 상호임피던스 및 시스-타상 도체간 상호 임피던스의 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고 있다.
- (2) 선로 배열이 일정할 경우 접속함간의 거리를 일정하게 하였을 때 시스순환전류는 0이 되었으나, 선로배열을 혼용할 경우 접속함간의 거리를 일정하게 하여도 시스 순환전류 저감효과는 크지 않았다.
- (3) 보통접속함(NJ)의 직접접지 저항은 시스순환전류 저감에 영향을 미치지 못한다.
- (4) 신설선로 시스순환전류 저감방안 제시
 - 케이블 배열을 모든 구간에서 균일하게 유지하고 가능한 접속함간의 거리도 일정하게 유지하여야 한다.
- (5) 기설선로 시스순환전류 저감방안 제시
 - 전력구식과 관로식이 혼용되어 있을 경우 전력구 방식에서 삼각배열의 표면 이격거리를 어느 정도 넓히는 것이 효과적이다.
 - 크로스본드 리드선에 소규모 크기의 저항이나 리액터 등 임피던스 성분을 삽입하는 것이 효과적이다.

또한 본 논문에서 제시한 시스순환전류 저감방안은 앞으로 신설되는 케이블 계통이나 시스순환전류가 문제가 되고 있는 기설선로의 저감방안 수립에 많은 기여를 할 것으로 사료되며 계속해서 새로운 저감 대책수립을 위한 지속적인 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 한국전력공사와 원광대학교 교비의 일부 지원에 의하여 연구됨

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "지중송전실무 I, II", 1996
- [2] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구, 1998.1
- [3] IEEE, "IEEE Guide for the application of sheath-bonding Methods for single-conductor cables and calculation of induced voltages and currents in cable sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988
- [4] J.S.Barrett, G.J.Anders, "Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths, and armour of electric power cables - mathematical models and

comparison with IEC Standard 287

- [5] M.G.Dwek, M.N.Eggleton, "Electric parameters of 400kV and 275kV cables used in England and Wales"
- [6] 한국전력공사 기술연구원, "전력계통 과도해석 프로그램 이론 및 활용에 관한 연구", 1991
- [7] 한국전력공사 기술연구원, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구", 1991
- [8] Turan Gonen, "Electric power transmission system engineering", John Wiley & Sons

저 자 소 개



정 채 균 (鄭 彩 均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2000년~현재 동 대학원 석사과정.
Tel : 063-850-6735
E-mail : chekyun@shinbiro.com



이 증 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수
Tel : 063-850-6735
E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr



강 지 원 (姜 地 原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
Tel : 042-865-5884
E-mail : jwkang@kepri.re.kr



장 태 인 (張 太 因)

1968년 12월 5일생. 1990년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994~1996년 삼성 SDS 근무. 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임보안연구원
Tel : 042-865-5878
E-mail : angeljti@kepri.re.kr