

지중송전계통의 시스순환전류 저감에 관한 연구

정 채 균* 홍 동 석* 이 증 범* 강 지 원** 유 철 환*** 강 율 탁***
 원광대학교* 한전 전력연구원** 한국전력공사***

A Study on the Reduction of Sheath Circulating Current in Underground Transmission Systems

C. K. Jung* D. S. Hong* J. B. Lee* J. W. Kang** C. H. Yu*** W. T. Kang***
 Wonkwang University* KEPRI** KEPCO***

Abstract - Sheath circulating current results from the change of sheath mutual impedance which is caused by unbalanced cable system, and different section length between joint boxes. If circulating over current flows in sheath, it produces much sheath loss which reduces the transmission capacity. And also such large sheath current influences severely on the operator. Recently, large sheath circulating current was partially measured in underground cable system of KEPCO. Accordingly, actual schemes to reduce sheath circulating over current is urgently required for installed cable system as well as newly-constructing cable system. This paper describes the analysis of sheath circulating current and various schemes to reduce the large circulating current in case of operating cable system using EMTP/ATPDraw. And also, possible schemes are proposed through a detailed analysis regarding cable systems by considering various electrical and environmental factors. It is evaluated that the proposed reduction schemes can be effectively applied to reduce the large sheath circulating over current with the minimized electrical problems.

이들 접속형태 및 구간길이를 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 NJ-16까지는 XLPE케이블로, 그 이후에는 OF케이블로 포설되어 있다. 또한 IJ-8까지는 전력구방식으로 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 종단접속함에서의 직접접지는 지중선공사의 지침을 고려하여 1(Ω)로 하였고, 보통접속함(NJ)에서의 직접접지는 10(Ω)로 하였다.

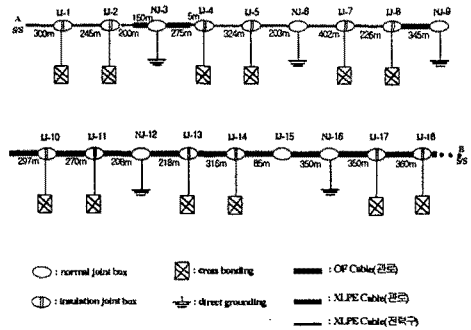


그림 1. 케이블의 접속형태 및 구간길이

1. 서 론

전력케이블에 전류가 흐르면 도체저항에 의한 손실, 유전체중에서 발생하는 손실 및 금속시스의 손실 등이 발생하는데, 특히 이 중에서 시스 손실은 도체전류와의 전자유도현상에 따른 시스 상호간 및 시스와 대지간의 시스순환전류로 인해 발생하게 된다.[1] 또한 전력구나 관로를 이용하여 운용되고 있는 우리 나라 지중송전계통은 케이블의 간격 및 높이의 고저차등을 유발시키고 있으며 지형적 구조 및 특성차이로 인해 여러 가지 전기적 불균형 현상이 나타나고 있는데, 이는 도체와 타상 시스간 상호임피던스 및 시스 상호임피던스 등에 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고있다. 시스순환전류가 상승하면 시스 손실 증가로 인해 케이블의 온도를 상승시켜 송전용량에 영향을 미치게되고 심화 될 경우 인체에 영향을 미칠 뿐만 아니라 절연체나 방석층의 파괴로 인한 고장을 유발할 수도 있어 시스순환전류를 억제시켜야만 한다. 그러나 전력케이블계통의 이러한 문제를 해결하기 위한 이론적, 해석적 시도가 매우 미흡하여서 국내실정에 알맞은 적절한 방안을 도출시키지 못하고 있는 실정에 있다.[2]-[4] 따라서, 본 논문에서는 실제 지중송전계통에서 시스순환전류 파악으로 문제가 되고 있는 실제통에 대해 EMTP/ATPDraw 및 계산식 등을 종합하여 시스순환전류를 해석하였고, 이로부터 시스순환전류의 특성을 다양하게 분석하였다.[5]-[6] 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 문제가 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(mm) XLPE 와 OF케이블이 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 케

2.2 시스순환전류 계산

시스순환전류를 계산하는 일반적인 계산식은 지중송전계통의 크로스본딩 된 한 구간에서 식 (1)과 같이 표현된다.[5]

$$I \cdot [z1][Isi] + m \cdot [z2][Isi] + n \cdot [z3][Isi] + [Vs] + 2R_e \sum_{i=1}^n Isi = 0 \quad (1)$$

여기서, I, m, n : 크로스본드 각 구간의 공간길이[km]
 [z1],[z2],[z3] : 각 구간에서의 케이블 시스 대지커로 임피던스 행렬[Ω/km]
 [Isi] : 케이블 시스순환전류 행렬[A]
 [Vs] : 케이블 시스유기전압 행렬[V]
 Re : 접지저항[Ω]

3. 시스순환전류 특성분석

본 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 측정한 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

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 시스의 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.

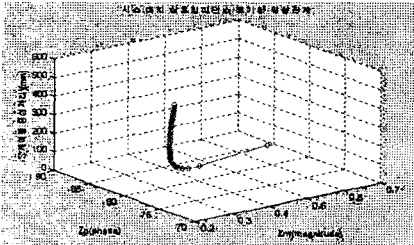


그림 2. 케이블 중심점간의 거리 변화에 따른 시스 상호임피던스의 크기와 위상비교

그림 2는 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 3에서 처럼 관로식으로 케이블의 보통접속함(NJ) 사이에서 교차 비점지방식으로 크로스본딩 되어 있는 한 구간(NJ-a~NJ-b)의 케이블 도체 중심점간 거리를 변화하였을 때 시스순환전류를 하였다. 도체 중심점간의 거리 변화에 따른 특성 분석을 위해 접속함간의 거리는 300(m)로 일정하게 하였으며 부하전류는 실제용 전류인 320(A)로 하였다.

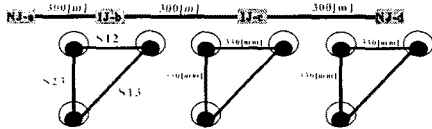


그림 3. 케이블 배열형태(관로식)

그림 4는 그림 3의 S12와 S13가 각각 100(mm)에서 500(mm)까지 변화할 때 각 상의 시스순환전류를 크기와 위상으로 나타낸 것이다. 좌측 그림은 S12가 변화할 때 각 상의 시스순환전류 특성을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 길이가 증가할수록 감소하다가 등가선간거리가 되는 330(mm)에서 최소값을 보인후 다시 서서히 증가하고 있다. 또한 S13가 변화할 때의 각상의 시스순환전류 특성을 나타낸 우측 그림도 마찬가지로 등가 선간거리가 되는 470(mm)에서 최소값을 나타내었다. 따라서 접속함간의 구간 길이가 일정할 때 케이블 선로의 일정한 배치를 통해 순환전류를 저감시킬 수 있음을 보였다.

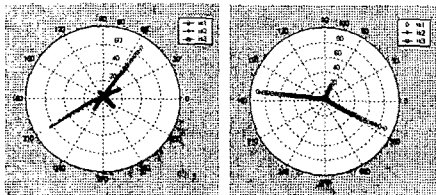


그림 4. S12 및 S13가 변화할 때 시스순환전류

3.3 선로구간길이와 시스순환전류

본 절에서는 선로구간길이와 시스순환전류의 관계를 분석하였다. 동일한 선로배열에서 케이블의 모든 구간이 동일할 때 시스순환전류는 이론적으로 영이 된다. 그림 5에서는 전력구방식의 삼각 배열형태로 포설되어있는 실제용의 A S/S~NJ-3구간의 접속함간의 거리를 각각 한구간씩 변화하였을 때 시스순환전류의 특성을 나타낸 것이다.

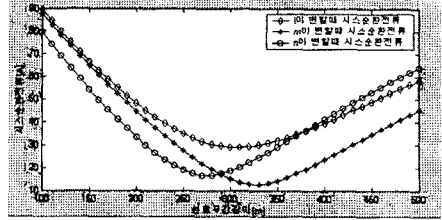


그림 5. 구간 길이의 변화에 따른 시스순환전류

그림에서처럼 시스순환전류는 선로의 등가길이에 가까운 250~350(m) 사이에서 가장 낮은 값을 보였다. 또한 관로식과 전력구식이 혼용되어있는 실제용 구간을 이용해 1J-5와 NJ-4사이의 선로 구간길이가 변할 때 각 상의 시스순환전류를 분석한 결과 시스순환전류는 구간길이의 증가에 반비례하여 감소하는 형태를 보여 선로구간길이가 등가적으로 구성되어있는 계통에 비해 영향은 적게 나타났다.

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

3.4 부하전류와 시스순환전류

본 절에서는 부하전류와 시스순환전류의 관계를 분석하였다. 본 논문에서의 모든 분석은 실 계통 부하전류인 320(A)를 적용하였으나, 본 절에서는 부하전류만을 변화하였을 때 나타나는 시스순환전류의 특성을 분석하기 위하여 이 전류를 변화시켰다.

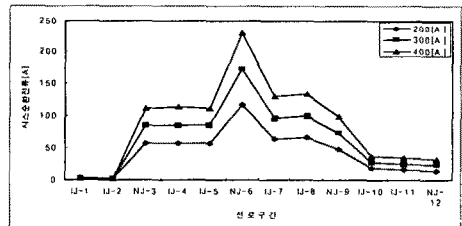


그림 6. 구간별 부하전류 변화에 따른 시스순환전류

그림 6은 4장에서 기술하는 전체 계통의 시뮬레이션 중 부하전류의 증감에 따른 각 접속함에서 시스순환전류의 변화 특성을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 시스순환전류는 부하전류에 비례하여 변화하고 있다.

4. 사례연구

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

표 2. 사례연구의 예

사 례 1	실계통 모델링
사 례 2	1J-2~NJ-3, NJ-3~1J-4 구간을 관로에서 전력구로 변환
사 례 3	1J-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 7은 사례 1인 실제계를 대상으로 시뮬레이션하여 얻은 상별 시스순환전류를 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 NJ-6에서 최대값을 보였으며 IJ-4 ~ NJ-9 구간사이에서 상승함을 알 수 있었다.

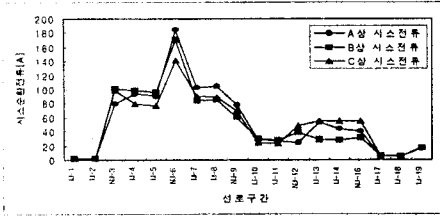


그림 7. 사례 1의 상별 시스순환전류

실제로 실측값이 있는 표 1에서와 같이 NJ-6에서 가장 높은 값을 보였다. NJ-3 ~ NJ-9까지의 선로는 전력구식과 판로식이 혼용되어 있는 구간으로 시스 상호임피던스 및 도체와 타상 구간 상호임피던스가 불균형해지며 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 판로식 포설로 인한 임피던스 변화 요인에 의한 영향을 동시에 받고 있으며 접속함간 길이도 불균형이어서 시스순환전류가 가장 상승하고 있는 것으로 사료된다. 또한 NJ-9 이후에는 모두 판로식으로 일정하게 포설되어 있어 시스순환전류가 점차 안정적으로 유지되고 있다.

따라서 본 논문에서는 시스순환전류가 상승하는 IJ-4와 NJ-9 사이의 값을 실측하여 각상의 실제 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 8에서는 실측치와 시뮬레이션결과의 A상전류를 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 서로 같은 유형으로 변화하고 있으며 실제 모델링에서 적용할 수 없는 케이블의 꺾임현상과 도면과 일치하지 않은 상별 간격 등 여러 환경적인 영향을 감안한다면 시뮬레이션은 상당히 정확하다고 평가되어 본 논문의 시뮬레이션 방법 및 결과는 상당히 정확성이 있다고 사료된다.

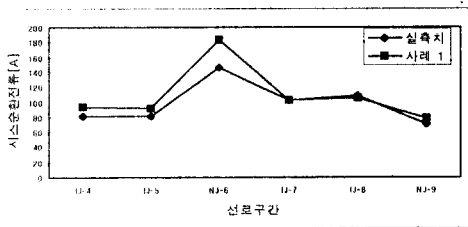


그림 8. 실측치와 시뮬레이션 값과의 비교(A상)

4.2 사례 2와 사례 3의 비교

사례 2와 3은 상호임피던스를 조정하였을 때 시스순환전류의 저감효과를 검증하기 위해 판로식으로 포설된 구간을 전력구식으로 변환하였다. 그림 9는 사례 1, 2, 3 각상의 A상 시스순환전류를 비교한 그래프이다. 사례 2는 NJ-6의 보통접속합까지는 시스순환전류가 저감하나 그 이후에는 영향을 못 미쳐 사례 1과 같은 결과를 보이고 있다. 이러한 결과를 전력구식 포설형태에 한 구간을 판로식으로 포설 했을 때 이는 3.2절의 분석대로 임피던스 불균형에 의한 영향의 시스순환전류 상승원인으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 NJ-6 이후 선로에 영향이 없는 이유는 시스순환전류는 보통접속합의 직접접지 지점으로 일부 빠져나가거나 대부분은 크로스본딩된 2구간의 보통접속합 사이에서만 순환하기 때문이다.

사례 3은 모든 구간에서 사례 1에 비해 시스순환전류가 저감되었고, 사례 2와는 달리 NJ-6이후에도 시스순환전류는 저감되었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 논문에서는 포설방법을 일정하게 함으로써 시스순환전류를 저감할 수 있음을 입증하였다. 또한 크로스본딩 사이의 보통접속합에서 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 판로식과 전력구식을 혼용하여 포설된 구간이나 접속함 간의 거리의 불균형이 심한 구간 등에서 주로 상승하게 된다.

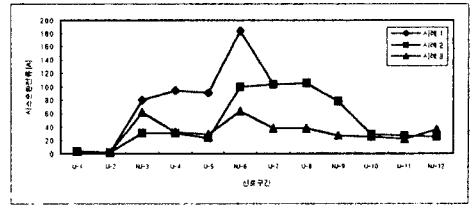


그림 9. 사례별 시스순환전류 비교(A상)

4.3 사례 4와 사례 5의 비교

사례 4와 5에서 제시한 접속함간의 구간길이를 변환하여 시뮬레이션한 결과를 사례 1의 결과와 비교하였다. 그림 10은 사례 4와 5를 사례 1과 비교한 그래프이다. 사례 4는 그림에서처럼 시스순환전류 저감효과는 크지 못했다. 따라서 선로의 배열을 혼용한 상태에서 선로 구간길이만 등가적으로 맞추어 주는 것은 순환전류 저감효과가 거의 없음을 증명하였다. 반면에 사례 5의 결과는 최대 5(A) 이하로서 사료 1과 비교하여 97%의 저감효과를 보여 매우 높은 저감효과를 보였다. 이러한 결과로 3.3절의 분석과 같이 선로배열을 일정히 유지하면서 선로 구간길이를 모두 등가적으로 구성하면 시스순환전류는 저감하는 특성을 입증하였다.

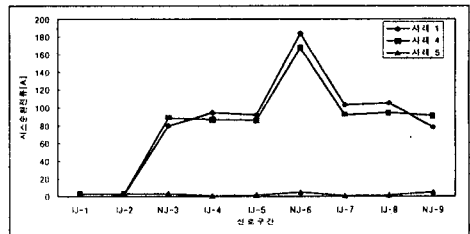


그림 10. 사례별 시스순환전류 비교(A상)

지금까지의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 선로 포설과정에 전력구식과 판로식의 혼용은 시스순환전류 상승의 가장 큰 원인으로 작용하고 있다. 또한 시스순환전류는 사례 3에서처럼 선로의 배열을 일정하게 유지시키면 상승하는 것을 방지할 수 있다. 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 실정으로서 케이블 시스의 온도상승으로 인한 절연파괴를 유발시키고 송전용량을 저하시키며 선로보수원에게는 신체접촉에 의하여 감전 등 피해를 줄 수 있는 시스순환전류 상승에 대한 저감대책 수립은 시급하고 하겠다.

본 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 11은 각 사례별 시스순환전류를 비교한 것이다. 또한 그림 12에서는 가장 높은 시스순환전류 값을 보이는 NJ-6의 최대 값을 기준으로 사례 1의 시스순환전류를 100[%]로 하였을 때 각 사례별 저감순서를 나타낸 것이다. 시스순환전류 저감순서는 사례 1, 사례 4, 사례 2, 사례 3, 사례 5의 순이며 사례 3은 66%의 저감효과를 보였으며 가장 낮은 시스순환전류 값을 보인 사례 5는 97%의 높은 저감효과를 보였고, 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 판로식 혹은 전력구식으로 균일하게 유지할

것을 적극 권장하며 가능한 한 사례 5의 경우처럼 접속함간의 거리도 일정하게 유지할 것을 시스순환전류 저감방안으로 제시한다.

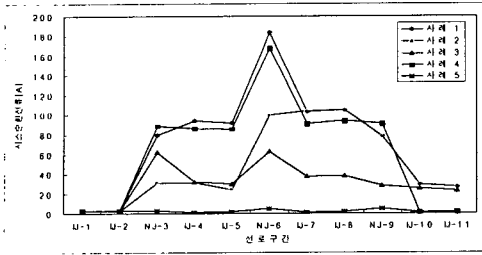


그림 11. 사례별 시스순환전류 비교

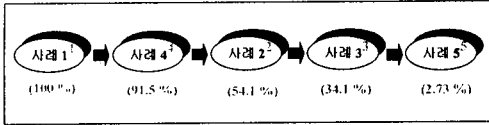


그림 12. 사례별 시스순환전류 저감 순서

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

표 3. 기설선로 적용방안의 예

제 1 방안	NJ-6 지점의 변경을 통한 선로길이에 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

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 조정 후 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

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]

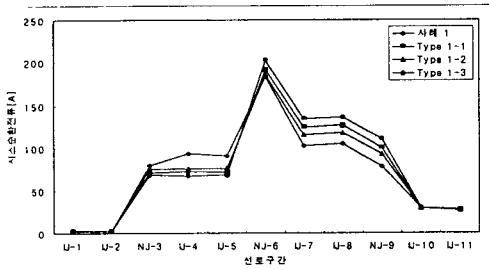


그림 13. 사례 1과 제 1방안의 Type별 시스순환전류 비교

그림 13에서는 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 보통접속함의 직접접지 저항을 변경하는 방안으로 현장에서 저감대책으로 쉽게 생각할 수 있는 부분이기도 하다. 따라서 본 논문에서는 접지저항과 시스순환전류와의 관계를 상세히 분석하였다.

그림 14에서는 모든 보통접속함(NJ)의 접지저항을 1[Ω]에서 100[Ω]까지 변화시켰을 때 시스순환전류를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 접지저항의 변화에 관계없이 시스순환전류는 사례 1과 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과를 통해 접지저항은 시스순환전류 저감에 영향을 미치지 못함을 검증하였다.

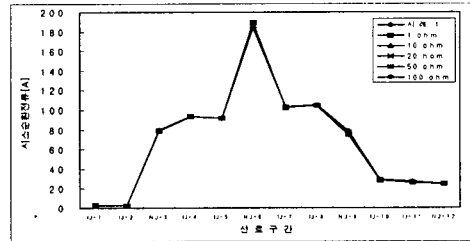


그림 14. 사례 1과 접지저항별 시스순환전류 비교

5.2.3 제 3 방안

제 3방안은 IJ-8까지 전력구식으로 포설된 구간의 케이블 상간 배열을 그림 15에서 나타낸 것처럼 변화를 주는 방안이다. 이 방안은 관로식과 혼용된 계통의 특성상 기존의 삼각배열 형태에서 발생하는 시스 상호임피던스의 불균형으로 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.

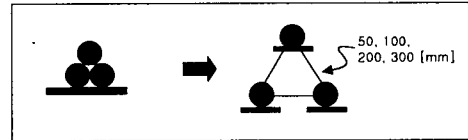


그림 15. 제 3방안 적용모델

제 3방안의 검토결과 관로식의 상간 케이블 도체 중심점간의 거리인 330[mm]에 가까워질수록 시스순환전류는 점차 저감한다. 한편 그림 16은 시스순환전류 최대점인 NJ-6에서 측정한 값을 기준으로 분석한 시스순환전류 저감순서이다. 그림에서 알 수 있듯이 50[mm]의 간격을 유지하였을 때는 사례 1의 시스전류를 100% 하였을 때 63%의 전류를 보였고 상간 표면 이격거리가 길어질수록 시스 상호 임피던스의 불균형이 해소되면서 시스순환전류는 계속 저감하다가 300[mm]의 간격으로 이격 하였을 때의 전류는 36.9%로 63.1%의 비교적 높은 저감효과를 나타내었다. 또한 상간 이격거리를 늘리므로 변화하는 시스 유효전압을 측정하여 사례 1과 비교한 결과 시스 유효전압은 최대 21[V]로 이는 기준값인 50[V] 이하이므로 시스유효전압 면에서도 안정적이었다.

따라서 본 논문에서는 기설선로의 시스순환전류 저감 방안으로 제 3방안으로 제시된 전력구로 포설된 구간의 표면 이격거리를 변경하는 것도 방안 중의 하나로 고려할 수 있다고 사료된다.

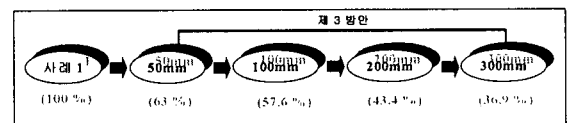


그림 16. 제 3방안의 시스순환전류 저감순서

5.2.4 제 4 방안

제 4방안은 시스순환전류가 상승되는 구간의 절연접속함(IJ)의

크로스본드 리드선에 저항을 삽입하는 방안으로서 저항을 삽입함에 따라 시스유기전압은 상대적으로 높아지지만 기준값 이하가 되며 상대적으로 많은 시스순환전류를 저감시킨다. 표 5는 제 4방안의 적용 예를 나타낸 것이다.

표 5. 제 4방안

Type	적용 방안
4-1	II-4, II-5의 크로스본드 리드선에 저항 삽입
4-2	II-5, II-7의 크로스본드 리드선에 저항 삽입
4-3	IJ-4, IJ-5, IJ-7, IJ-8의 크로스본드 리드선에 저항 삽입

그림 17은 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.

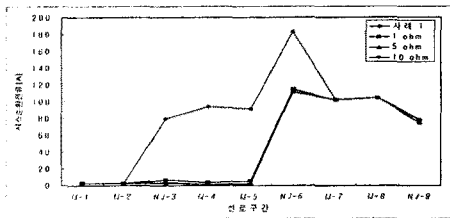


그림 17. 사례 1과 Type 4-1의 시스순환전류 비교

그림 18은 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 19에서처럼 시스유기전압도 기준값인 50[V]이하를 보여 안정적인 것으로 판명되었다.

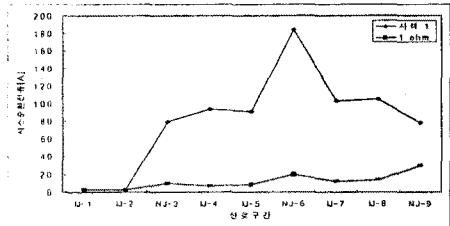


그림 18. 사례 1과 Type 4-2의 시스순환전류 비교

따라서 본 논문에서는 시스순환전류가 순환하는 한 구간의 크로스본드 리드선에 저항을 삽입 할 경우 시스순환전류의 저감 효과가 우수하다는 것을 입증하였으며 시스유기전압도 기준값 이하임을 입증했다. 또한 NJ-6 전후의 두 구간인 IJ-4와 IJ-5, 그리고 IJ-7과 IJ-8에 각각 저항을 삽입하였을 때의 시스순환전류이다. 그림에서처럼 저감 효과는 가장 우수하게 나타났으며 NJ-6 지점의 시스 전류는 1[Ω]일 경우 11[A]로 측정되어 94[%]의 저감효과를 보였다. 그리고 시스유기전압도 그림 19에서처럼 가장 높은 것으로 예상되었던 10[Ω]의 경우에서도 기준값에 못 미치는 전압으로 안정적이었다.

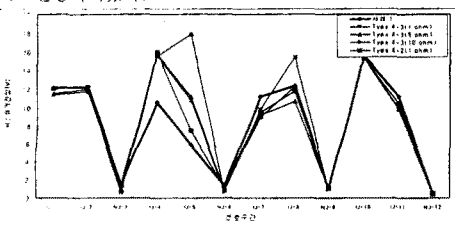


그림 19. 사례 1과 제 4방안의 시스유기전압 비교

제 4방안을 검토한 결과 시스유기전압도 안정적인 뿐만 아니라 그림 20에 나타낸 것처럼 시스순환전류의 저감효과도 매우 높고 판단되어 본 논문에서는 크로스본드 리드선에 저항 등 임피던스 성분을 삽입해 시스순환전류를 저감하는 방안도 기설선로의 시스순환전류 저감대책의 하나로 고려될 수 있을 것으로 사료된다.

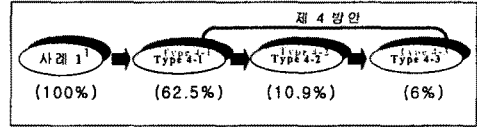


그림 20. 제 4방안의 시스순환전류 저감순서

시스순환전류 상승의 주요원인은 계통의 불안정한 구성에 있다. 그래서 기설선로의 경우 시스순환전류를 저감하는 것은 신설선로에 비해 매우 어려운 것이 사실이나, 본 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 시스유기전압 상승 및 저항체에 소모되는 에너지량을 고려하여 리액터 성분도 포함한 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 입증했고 시스순환전류의 특성 분석을 통해 저감방안을 제시하였다. 본 논문에서 분석한 내용과 저감방안을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선로 배열의 혼용(전력구식 + 관로식)은 시스 상호인피던스 및 시스-타상 도체간 상호 인피던스의 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고 있다.
- (2) 선로 배열이 일정할 경우 접속합간의 거리를 일정하게 하였을 때 시스순환전류는 0이 되었으나, 선로배열을 혼용할 경우 접속합간의 거리를 일정하게 하여도 시스 순환전류 저감효과는 크지 않았다.
- (3) 시스순환전류는 부하전류에 비례하여 변화한다.
- (4) 접지저항은 시스순환전류 저감에 영향을 미치지 못한다.
- (5) 신설선로 시스순환전류 저감방안 제시
 - 케이블 배열을 모든 구간에서 균일하게 유지하고 가능한 접속합간의 거리도 일정하게 유지하여야 한다.
- (6) 기설선로 시스순환전류 저감방안 제시
 - 전력구식과 관로식이 혼용되어 있을 경우 전력구 방식에서 삼각배열의 표면 이격거리를 어느 정도 넓히는것이 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.

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