

고조파 공진 억제를 위한 완충부하 투입량 분석에 관한 연구

| |
|--------|
| 논문 |
| 59-2-6 |

A Study on the Analysis of Damping Loads to Prevent Harmonic Resonance

임 찬 호[†] · 이 경 섭* · 유 원 근** · 이 흥 재***
(Chan-Ho Lim · Kyeong-Seob Lee · Won-Kun Yu · Heung-Jae Lee)

Abstract - During the restoration process of primary restorative transmission system, the over voltage may happen due to nonlinear interaction between the unloaded transformer and the transmission system. This over voltage is caused by harmonic resonance and can be prevented by damping loads that are connected before restoration process of primary restorative transmission system. But it is very difficult to predict the occurrence possibility of the harmonic resonance previously.

This paper analyzes the relationship between the harmonic resonance and the amount of damping loads to prevent the harmonic resonance. This paper calculates the minimum amount of damping loads to prevent harmonic resonance while changing the length of primary restorative transmission line. And this paper confirmed that the amount of damping loads is not proportional to length of transmission line. The result of this paper will be used as important experiment data to predict the occurrence possibility of harmonic resonance previously.

Key Words : Harmonic Resonance, Over Voltage, Damping Load,

1. 서 론

세계 각국에서는 광역정전이 발생할 경우 초기 대응방안으로써 전체 계통을 개방하고 우선공급계통에 대한 복구절차를 진행하며, 국내의 대응방안도 대동소이하다. 그러나 미국, 캐나다, 프랑스 등의 국가에서 채택하고 있는 극초고압(500kV, 765kV)의 우선공급계통에 대한 초기 복구과정에서 고조파 공진에 기인한 이상전압이 발생[1-4]하였으며, 상대적으로 저압(154kV)인 국내에서도 일부 우선공급계통에서 고조파 공진에 의한 이상전압의 발생 가능성이 최근 제기되었다.[5-6] 초기복구과정에서 발생하는 이상전압은 계통운영의 안정성을 저해하고, 복구시간 지연 등의 매우 심각한 문제를 내포하고 있다. 따라서 국내에서도 고조파 공진의 발생 가능성을 사전에 예측하고 대비하고자 하는 노력이 필요하게 되었다.

고조파 공진에 의한 이상전압은 송전선로와 무부하 변압기의 비선형 포화특성에 기인하며, 또한 변압기의 자화 돌입전류 및 우선공급계통의 구성형태에 종속되어 다양하게 발생할 수 있다. 그러므로 고조파 공진에 의한 이상전압은 송전선로 및 무부하 변압기의 비선형 특성과 우선공급계통의 다양한 구성형태로 인하여 발생 가능성을 사전에 예지하기

매우 난해하다. 따라서 초기 복구단계에서 고조파 공진에 의한 이상전압의 발생 가능성을 사전에 예지하기 위한 실험식의 개발은 계통운영의 안정성을 확보하기 위하여 필수적으로 해결해야 하는 문제이다. 그러나 고조파 공진에 의한 이상전압은 발생 사례도 적고, 아직까지 현상을 해석하기 위한 연구도 미미한 상황이다.

현재까지 고조파 공진에 의한 이상전압을 억제시키기 위하여 제시된 방법론으로서는 적절한 완충부하를 사전에 투입하고, 우선공급계통에 대한 복구절차를 진행하는 IEEE 워킹그룹의 권고안이 유일하다.[2] IEEE 워킹그룹에서는 우선공급 선로의 공장을 기준으로 3MW/Mile의 완충부하 투입량 권고기준을 제시하고 있다. 그러나 이와 같은 IEEE 워킹그룹의 완충부하 투입 권고기준은 500kV급 미국 동북부 지역의 우선공급계통에서 도출된 값으로, 실질적인 완충부하 투입량은 각 국가의 우선공급계통 체계에 따라 다르게 나타날 수 있다.

본 논문에서는 고조파 공진의 발생 가능성을 예측하고 대비하기 위한 실험식 개발의 사전 단계로서 국내의 권역별 우선공급계통 중에서 최근 고조파 공진의 발생 가능성이 제기된 영동지역 우선공급계통을 대상으로 우선공급 선로의 공장과 완충부하 투입량의 상관관계를 분석하였다. 본 논문에서는 우선공급 선로의 공장에 대한 완충부하 투입량의 관계를 분석하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하였으며, 귀납적 모사방법론을 이용하여 영동지역 우선공급 선로의 각 공장 별 최소 완충부하 투입량을 산정하였다. 본 논문에서 산정한 영동지역 우선공급계통의 완충부하 투입량은 우선공급 선로의 공장에 단순 비례하여 증가하지 않고, 일정한 거리가 지나면 오히려 감소하는 구간이 발생하는 것으로 분석

† 교신저자, 정회원 : 경주대 컴퓨터공학과 부교수 · 공박

E-mail : chlim@gju.ac.kr

* 정 회원 : 주암전기통신 선임연구원 · 공박

** 정 회원 : 광운대 공대 전기공학과 · 박사과정

*** 시니어회원 : 광운대 공대 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 10월 26일

최종완료 : 2010년 1월 4일

되었다. 이와 같은 분석 결과는 IEEE 워킹그룹에서 제시하고 있는 완충부하 투입 권고기준과 매우 현저한 차이를 보여주고 있다.

본 논문의 분석 결과는 향후 고조파 공진의 발생 가능성을 사전에 예지하기 위한 실험식 개발의 중요한 자료로서 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 영동지역 우선공급 계통

세계 각국에서는 광역정전 복구를 위하여 분산형 복구방안을 채택하고 있다. 즉, 광역정전이 발생할 경우 권역별 우선공급계통을 복구하고, 복구된 우선공급계통을 기반으로 분할계통을 연계하는 방식이다.

국내에서는 광역정전에 신속히 대처하기 위하여 전국을 7개의 우선공급계통으로 분할하여 운영하고 있다. 국내의 우선공급계통은 154kV 선로를 기반으로 구축되어 있으며, 345kV 선로를 일부 사용하고 있다. 국내의 우선공급계통은 구미 선진국에 비하여 비교적 저압이므로 고조파 공진의 발생 위험이 상대적으로 낮은 상황이다. 그러나 비상시 운영 절차를 정밀 검토하는 과정에서, 국내의 일부 우선공급계통에서도 고조파 공진에 의한 이상전압의 발생 가능성이 제기되어 있다.

그림 1은 최근 고조파 공진에 의한 이상전압의 발생 가능성이 제기되어 있는 영동지역 우선공급계통을 도시하고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 영동지역 우선공급계통은 주선로와 예비선로로 구성되어 있다. 주선로의 자체기동 발전소는 충주수력 발전소이며, 예비선로의 자체기동 발전소는

강릉수력 발전소이다. 영동지역 계통에서 우선공급 발전소는 4기의 울진 원자력 발전소이며, 주선로와 예비선로의 우선공급 송전선로는 각각 충주수력#1 선로와 강릉수력#1 선로이다. 영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진을 억제시키기 위한 완충부하는 충주 변전소와 강릉 변전소의 변압기에 연결된 배전부하를 이용하게 되며, IEEE 워킹그룹에서는 우선공급 선로의 공장에 비례하여 완충부하 투입량을 결정하도록 권고하고 있다.

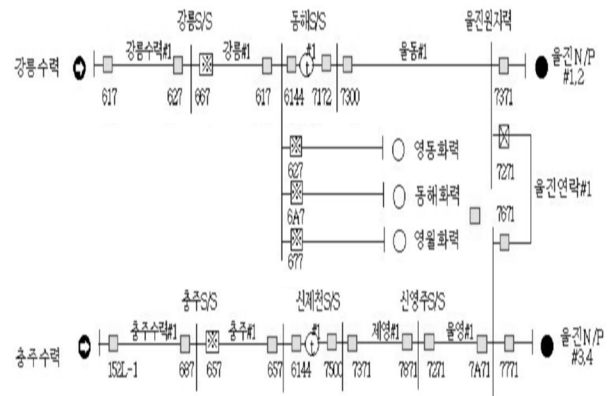


그림 1 영동지역 우선공급 계통

Fig. 1 The primary transmission system at Youngdong

본 논문에서는 영동지역 우선공급계통을 대상으로 고조파 공진에 의한 이상전압을 해석하고, 고조파 공진을 억제시키기 위한 최소 완충부하 투입량을 산출하기 위하여 EMTDC

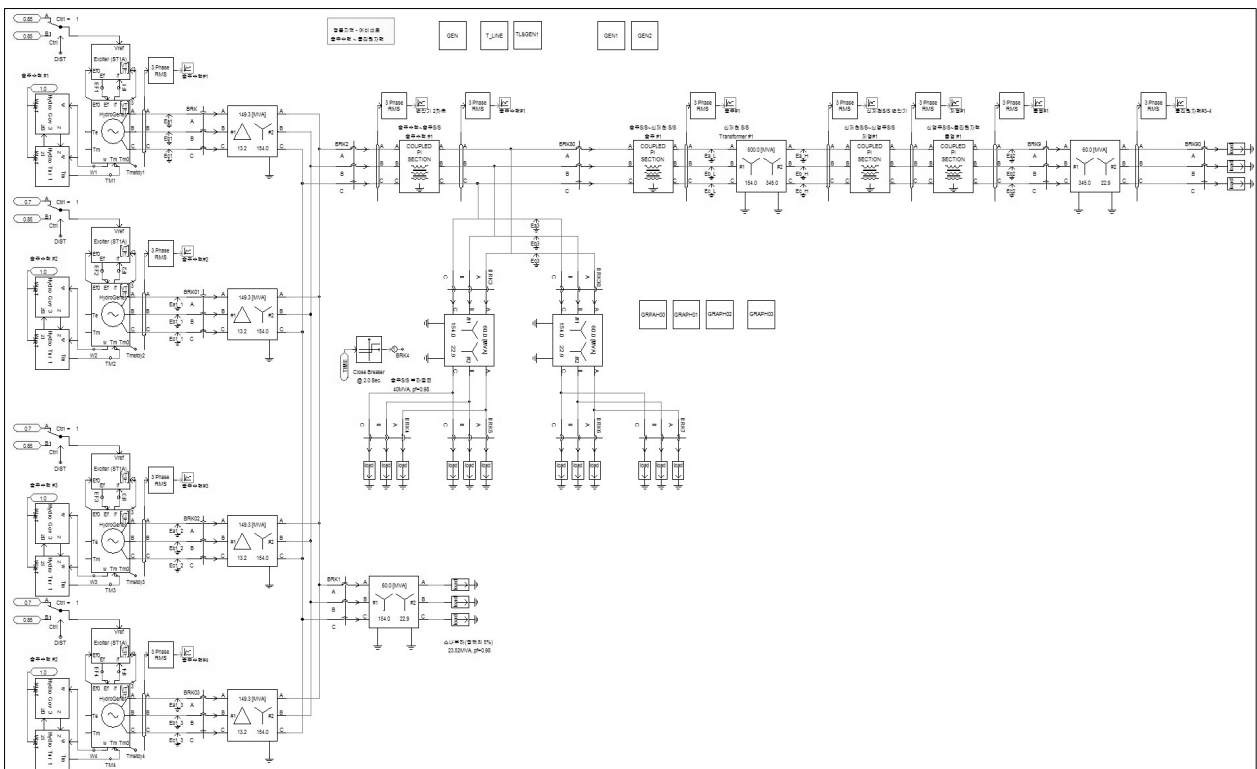


그림 2 영동지역 EMTDC 모의계통

Fig. 2 The simulation system of EMTDC at YoungDong

모의계통을 구축하였다. 본 논문에서는 영동지역 우선공급 계통 중에서 주선로에 대한 모의계통을 구축하였으며, 그림 2는 본 논문에서 구축한 EMTDC 모의계통을 도시하고 있다.

그림 2에서 보는 바와 같이 자체기동 발전소인 충주수력 발전소는 4기의 발전기가 모의계통에 포함되어 있으며, 우선 공급 발전소인 울진 원자력 발전소는 주선로에 연결된 #3, #4 발전기만 포함되어 있다. 또한 충주 변전소는 2기의 변압기가 모의계통에 포함되어 있으며, 배전부하를 모의할 수 있도록 12개의 고정 부하를 포함하고 있다. 본 논문에서는 충주 변전소에 포함된 고정 부하를 이용하여 완충부하 투입을 모의하였으며, 완충부하는 2기의 변압기에 균등하게 분산시켜 투입할 수 있도록 하였다. 또한 모의계통은 우선공급 선로인 충주수력#1 송전선로의 공장을 가변시킬 수 있도록 구성되어 있다.

본 논문에서는 그림 2의 주선로에 대한 모의계통을 이용하여 EMTDC 모의실험을 수행하였다. 우선공급 선로인 충주수력#1 송전선로의 공장을 변화시키면서 각 공장 별 최소 완충부하 투입량을 산출하였으며, 공장 별 완충부하 투입량의 상관관계를 분석하였다.

2.1 영동지역 우선공급계통의 고조파 공진 분석

영동지역 우선공급계통은 비상시 운영절차 검토과정에서 고조파 공진의 발생 가능성이 제기된 계통이다. 본 절에서는 영동지역 우선공급계통에서 발생하는 고조파 공진을 관찰하였다.

본 절에서는 무부하 상태에서 영동지역 우선공급계통에 대한 복구절차를 모의하였으며, 우선공급 선로인 충주수력 #1 선로의 공장은 현재 실계통에서 운영되고 있는 7.94km로 설정하였다. 본 모의실험에서는 충주 변전소의 자체기동 발전기를 기동시키고, 1초 후에 우선공급 선로인 충주수력#1 송전선로를 가압하였으며, 1.5초 후에 충주 변전소의 변압기를 가압하였다.

그림 3은 영동지역 우선공급계통에 대하여 무부하 상태에서 복구할 경우 고조파 공진에 의한 이상전압을 관찰한 결과이다.

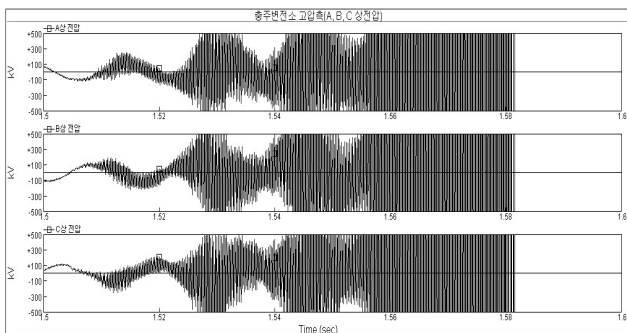


그림 3 무부하시 충주 변전소 상전압
Fig. 3 Phase voltage of Chungju SS in no load

그림 3에서 보는 바와 같이 영동지역 우선공급계통에서는 완충부하를 투입하지 않고 무부하 상태로 광역정전 복구절

차를 진행할 경우 고조파 공진에 의한 이상전압이 발생하였다. 충주수력 발전소의 자체기동 발전기를 기동시키고 1.5초 후에 가압한 충주 변전소의 변압기 1차측 상전압은 가압 직후 고조파 공진이 발생하여 0.03초 이내에 안정한 범위를 벗어나 500kV를 초과하였다. 또한 자체기동 발전기 가압 후 1.55초 후에는 변압기의 1차측 상전압이 안정한 범위를 완전히 벗어나고 있음을 관찰할 수 있다.

2.2 영동지역 우선공급계통의 고조파 공진 억제

영동지역 우선공급계통의 복구과정에서 발생하는 고조파 공진에 의한 이상전압을 억제시키기 위하여 현재까지 제시된 방법은 변압기에 적당한 완충부하를 사전에 투입하고, 복구절차를 진행하는 방안이 유일하다. 그리고 IEEE 워킹그룹의 완충부하 투입 권고량은 우선공급 선로의 공장을 기준으로 3MW/Mile이다. 본 절에서는 영동지역 우선공급계통에서 발생하는 고조파 공진을 억제시키기 위하여 변압기에 완충부하를 사전에 투입하고 복구하는 절차를 모의하였다.

영동지역 우선공급계통에서 충주수력#1 선로의 실계통 공장은 7.94km이며, 약 5마일에 해당한다. 그러므로 영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진을 억제시키기 위하여 사전에 투입해야 하는 완충부하는 IEEE의 권고량 기준으로 15MW이다.

그림 4는 IEEE 워킹그룹의 완충부하 투입 권고량을 기준으로 충주 변전소의 변압기에 15MW의 완충부하를 투입하고 복구절차를 진행할 경우 고조파 공진에 의한 이상전압을 관찰한 결과이다.

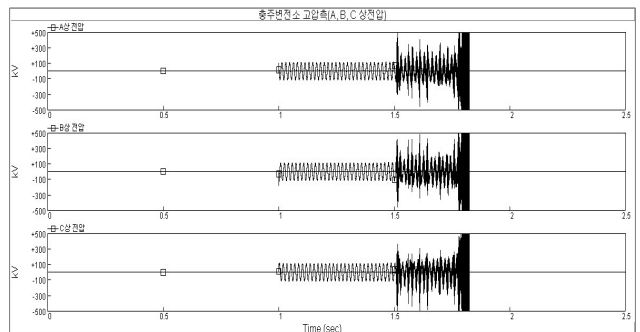


그림 4 15MW 부하 투입시 충주 변전소 상전압
Fig. 4 Phase voltage of Chungju SS in 15MW

그림 4에서 보는 바와 같이 영동지역 우선공급계통에서는 IEEE 워킹그룹의 권고기준과 부합하는 15MW의 완충부하를 사전에 투입하고 복구절차를 진행할 경우에도 고조파 공진에 의한 이상전압이 발생하였다. 사전에 투입한 15MW의 완충부하는 변압기 가압 후 고조파 공진에 의한 이상전압의 발생을 지연시키는 효과를 보이고 있으며, 변압기 가압 후 0.28초 후에는 변압기의 1차측 상전압에서 고조파 공진으로 인한 이상전압을 관찰할 수 있다. 이와 같은 모의실험 결과를 기반으로 IEEE 워킹그룹에서 제시하고 있는 완충부하 투입 권고량은 국내의 영동지역 우선공급계통에 그대로 적용할 수 없으며, 최소 완충부하 투입량을 새롭게 산정하여 사용할 필요성을 확인하였다.

영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진에 의한 이상전압을 억제시킬 수 있는 최소 완충부하 투입량을 산정하기 위하여 이진탐색 기법을 이용하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험 결과 영동지역 우선공급계통의 7.94km 공장에서 고조파 공진 현상을 억제시키기 위한 최소 완충부하 투입량은 83MW로 산정되었다.

그림 5는 본 논문에서 새롭게 산정한 83MW의 완충부하를 사전에 투입하고 고조파 공진 현상을 관찰한 결과이다.

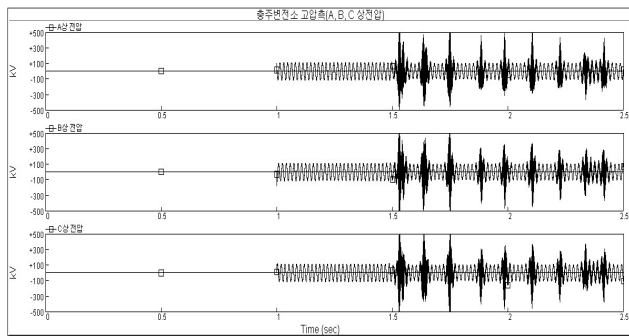


그림 5 83MW 부하 투입시 충주 변전소 상전압
Fig. 5 Phase voltage of Chungju SS in 83MW

그림 5에서 보는 바와 같이 83MW의 완충부하를 사전에 투입할 경우 고조파 공진이 억제되어 충주 변전소의 변압기 1차측 상전압에는 이상전압이 발생하지 않았다. 자체기동 발전기를 가압하고 1.5초 후에 변압기를 가압하는 과정에서 500kV 정도의 일시적인 이상전압이 관찰되지만 곧 감쇄되어 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 변압기 가압 후 약 1초가 경과되면 고조파 공진이 완전히 상쇄되고 이상전압도 관찰되지 않는다. 따라서 영동지역 우선공급계통에서는 IEEE 워킹그룹에서 권고하고 있는 기준보다 5.5배 큰 완충부하를 투입하여야 고조파 공진을 억제시킬 수 있음을 확인하였다.

3. 우선공급 선로 공장과 완충부하 투입량 관계 분석

고조파 공진의 억제를 위하여 IEEE 워킹그룹에서는 우선공급 선로의 공장에 단순 비례하여 완충부하 투입량을 결정하도록 권고하고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 국내의 영동지역 우선공급계통에서는 이와 같은 IEEE 워킹그룹의 완충부하 투입 권고기준과 매우 상이한 결과를 보였다. 즉, 영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진을 억제시키기 위한 완충부하 투입량은 IEEE 워킹그룹에서 제시하고 있는 완충부하 투입 권고기준보다 5.5배 크게 산정되었다.

본 절에서는 고조파 공진을 억제시키기 위한 최소 완충부하 투입량을 우선공급 선로의 각 공장 별로 산정하고, 우선공급 선로의 공장과 최소 완충부하 투입량의 상관관계를 분석하였다. 본 절에서는 각 공장 별 최소 완충부하 투입량을 산정하기 위하여 귀납적 모사방법론과 이진탐색 기법을 이용하였으며, 영동지역 우선공급계통의 우선공급 선로인 충주수력#1 송전선로의 실계통 공장(7.94km)을 기준으로 50% 공장에서 600% 공장까지 50% 단위로 각 공장 별 최소 완충부하 투입량을 산정하였다. 또한 본 절에서는 완충부하를

투입하지 않고 무부하 상태에서 정전복구 절차를 진행할 경우에도 고조파 공진이 발생하지 않는 공장 영역을 확인하였다.

그림 6은 충주수력#1 선로의 각 공장 별 최소 완충부하 투입량의 상관관계를 도시하고 있다.

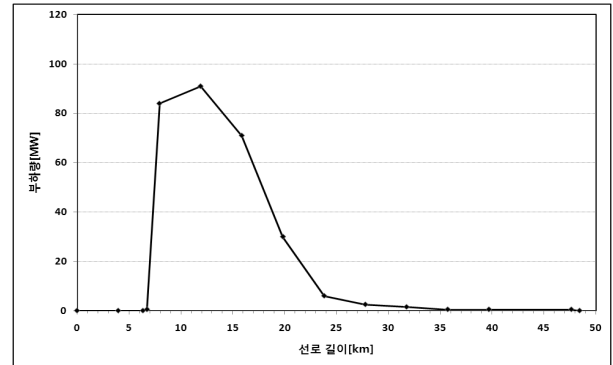


그림 6 우선공급 선로 공장에 대한 완충부하 투입량
Fig. 6 The amount of damping loads to T/L length

그림 6에서 보는 바와 같이 영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진을 억제시키기 위한 최소 완충부하 투입량은 IEEE 워킹그룹의 권고기준과 상이하게 우선공급 선로의 공장에 단순 비례하지 않았으며, 특정구간을 지나면 오히려 감소하였다. 또한 우선공급 선로의 공장이 더욱 확장됨에 따라 미량의 완충부하를 투입하여도 고조파 공진을 충분히 억제시킬 수 있었다. 또한 충주수력#1 송전선로의 150% 공장에 해당하는 11.91km에서 가장 큰 완충부하를 투입하여야 고조파 공진을 억제시킬 수 있었으며, 이때의 완충부하 투입량은 91MW로 산정되었다.

본 절에서는 고조파 공진의 발생 가능성이 제거된 우선공급계통에서도 특정 공장에서는 고조파 공진이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 충주수력#1 선로의 80% 공장에 해당하는 6.35km 보다 짧은 공장에서 고조파 공진이 발생하지 않았으며, 610% 공장에 해당하는 48.42km 보다 긴 공장에서 고조파 공진이 발생하지 않았다. 따라서 고조파 공진은 우선공급 선로의 공장에 따라 다르게 나타날 수 있음을 확인하였다.

본 절의 이와 같은 결과를 기반으로 영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진을 억제시키기 위한 최소 완충부하 투입량은 IEEE 워킹그룹의 권고기준과 매우 상이한 것으로 분석되었으며, 향후 고조파 공진의 억제를 위한 실험식 개발에 중요한 자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 영동지역 우선공급계통에서의 고조파 공진과 우선공급 선로의 각 공장 별 최소 완충부하 투입량의 상관관계를 분석하였다. 본 논문의 분석 결과 영동지역 우선공급계통에서 고조파 공진을 억제시키기 위한 완충부하 투입량은 우선공급 선로의 공장에 단순 비례하지 않고 특정구간이 지나면 완충부하 투입량이 오히려 감소하는 것을 확인하였다. 또한 우선공급 선로의 공장에 따라 완충부하 투

입 없이 고조파 공진이 발생하지 않는 구간이 존재함을 확인하였다. 이와 같은 분석 결과는 IEEE 워킹그룹의 완충부하 투입 권고기준과 현저한 차이를 보이고 있다. 본 논문의 분석 결과는 향후 고조파 공진을 예측하기 위한 실험식 개발에 중용한 기초자료로서 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2008-08) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] G. Morin, et al., "Service Restoration Following a Major Failure on the Hydro-Quebec Power System." IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 2, pp. 454-462, 1987.
- [2] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration Issues," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, 1991.
- [3] M. M. Adibi et al., "Overvoltage Control During Restoration (Power System Restoration Working Group Report)," IEEE Trans. on PWRs, Vol. 7, No. 4, pp. 1464-1470, 1992.
- [4] M. M. Adibi et al., "Special Consideration in Power System Restoraion The Second Working Group Report," IEEE Trans. on PWRs, Vol. 9, No. 1, pp. 15-21, 1994
- [5] 이흥재 외, "EMTDC를 이용한 시송전 계통의 고조파 공진 분석," 대한전기학회논문지, 제54A권 제4호, pp. 172-176, 2005.
- [6] 이흥재 외, "시송전 계통의 고조파 공진현상에 대한 분석," 대한전기학회논문지, 제55A권 제5호, pp. 191-194, 2006.
- [7] H. J. Lee, et al., "Analysis of the Harmonic Resonance during Energizing the Primary Restorative Transmission Systems," ICEE 2006, Proceeding of ICEE2006, 2006
- [8] M. Adibi, et al., "Power System Restoration - A Task Force Report," IEEE Trans. on Power System, Vol PWRs-2, No. 2, pp. 271-277, 1987.

저 자 소 개



임 찬 호 (林 讚 鎬)

1968년 8월 11일생. 1991년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경주대 컴퓨터멀티미디어공학부 부교수

Tel : 054-770-5174

Fax : 054-770-5314

E-mail : chlim@gju.ac.kr



이 경 섭 (李 彞 信)

1974년 7월 5일생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주)주암전기통신 선임연구원.

Tel : 02-963-1192

E-mail : kyeong@kw.ac.kr



유 원 근 (朴 文 壽)

1976년 3월 15일생. 2003년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학 중.

Tel : 02-940-5147

E-mail : y자@kw.ac.kr



이 흥 재 (李 興 載)

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수

Tel : 02-940-5147

Fax : 02-918-3793

E-mail : hjlee@kw.ac.kr