

초전도 한류기 적용시 소형 분산전원시스템의 연계 위치에 따른 배전계통의 전압강하 분석

Analysis on Bus Voltage Sag in Power Distribution System with SFCL according to Interconnected Locations of Small DG

문 중 필* · 손 진 근*
(Jong-Fil Moon · Jin-Geun Shon)

Abstract - This paper analyze the bus voltage sags in the power distribution system with a small scale cogeneration system when the superconducting fault current limiter was introduced. Among the solutions to decrease the short-circuit current considering the locations of the small scale cogeneration system, the superconducting fault current limiter (SFCL) has been announced as one of the promising methods to reduce the fault current because the installation of the small scale cogeneration system which increases the short-circuit current. According to the application locations of the small scale cogeneration system in a power distribution system, it has caused the variations of voltage sag and duration which depends on the change of the short-circuit current, which can make the operation of the protective device deviate from its original set value when the fault occurs. To investigate the voltage sag when a SFCL was applied into a power distribution system where the small scale cogeneration system was introduced into various locations, the SFCL, small scale cogeneration system, and power system are modeled using PSCAD/EMTDC. In this paper, the effects on voltage sags are assessed when the SFCL is installed in power distribution system with various locations of the small scale cogeneration system.

Key Words : Superconducting fault current limiter, Distributed generation, Protective coordination, Voltage sag

1. 서 론

지속적인 전력수요의 증가로 인하여 송배전선로의 신설과 선로 구성의 변화, 신재생에너지를 포함한 분산전원의 전력계통 연계로 계통 용량이 점차 증가하고 있다. 이런 계통에서 고장발생시 고장전류는 보다 증가하여 단락용량이 차단기의 차단용량을 넘어가게 되고, 고장전류를 차단하지 못할 가능성이 존재하게 되었다. 이에 따라 고장전류에 대처하는 방안 중 비용과 손실을 고려하여 초전도 한류기를 적용하는 방안이 주목받고 있다. 초전도 한류기는 정상상태에서 초전도 상태로 계통에 영향을 주지 않다가, 일정전류 이상의 고장전류가 발생하면 저항이 발생되어 고장전류를 감소시켜주는 역할을 하는 장치로 계통을 보호하게 된다[1-3].

초전도 한류기를 계통에 적용하기 위하여 지속적인 연구가 진행 중이며, 특히 배전계통에서 분산전원의 연계에 따라 보호협조, 전기품질 등 영향을 주기 때문에 분산전원이 연계된 배전계통에 초전도 한류기를 적용하기 위하여 추가적인 연구가 필요하다.

분산전원이 배전계통에 연계되었을 경우 연계되는 위치

모선 또는 선로에 따라 고장 발생시 보호기기에 발생하는 오부동작을 분석한 사례 [5]가 있으나 초전도한류기와 전압강하에 대한 분석이 진행되지 않았다. 또한, 분산전원 연계와 초전도한류기의 적용시 고장전류 영향과 보호기기의 동작을 분석하여 분산전원과 초전도한류기 적용시 발생하는 보호기기의 동작을 위한 제안방안을 제시 [6-8]한 연구사례가 있으나 이 역시 전압강하 분석에 대하여 미흡한 결과를 보여주고 있다 [4-8].

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 보호기기, 저항형 초전도 한류기, 분산전원을 모델링하고 분산전원이 배전계통에 연계되어 보호기기의 영향에 따라 초전도 한류기를 적용할 경우 순간전압강하(Sag)에 대한 효과를 분석하였다. 분산전원과 초전도 한류기의 적용 유무에 따라 모선 전압의 전압강하 크기를 비교하였다.

2. 배전계통 및 초전도 한류기 모델링

2.1 배전계통 모델링

본 논문에서는 분산전원의 배전계통 연계로 증가된 고장전류를 저감시키는 방안으로 초전도 한류기를 적용하였을 때, 모선 전압의 순간전압강하 개선에 대한 분석을 위하여 그림 1과 같이 배전계통을 구성 모델링하였다[6,7].

차단기를 동작시키기 위하여 단방향 배전계통에서 일반적으로 사용하는 과전류계전기를 이용하였으며, 부하는 10 [MVA], 9 [MVA]의 일반적인 피더와 여러 피더를 하나의 피더로 증가화한 26 [MVA] 등 총 3개의 피더로 구성하였다.

† 교신저자, 정회원 : 가천대학교, 전기공학과 교수, 공박
E-mail: shon@gachon.ac.kr

* 종신회원 : 한국교통대학교 전기공학과 부교수 · 공박
접수일자 : 2013년 9월 12일
수정일자 : 2013년 11월 1일
최종완료 : 2013년 11월 27일

배전계통에 분산전원을 연계하는 방법으로 모선에 연계하는 방안과 선로 중간 및 말단에 연계하는 방안이 있다. 본 논문에서는 분산전원의 위치에 따라 모선 전압을 분석하기 위하여 모선에 적용하는 사례와 선로의 길이를 조절하여 선로의 중간과 말단에 분산전원을 적용하는 사례를 구성하였다. 고장 모의는 분산전원을 연계한 지점의 뒤에서 1선 지락 고장을 모의하여 보호기기의 동작을 분석하고 이에 따른 모선 전압을 분석하였다.

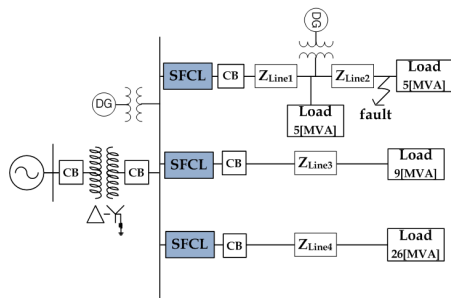


그림 1 배전선로 모델링
Fig. 1 Modeling of power distribution system

배전선로의 기본 구성 파라미터와 보호기기인 차단기의 지락 과전류계전기의 설정에 대한 정정 값은 표 1과 같다.

표 1 배전계통 및 지락 과전류 계전기 구성 파라미터
Table 1 Parameters of power distribution system and over-current ground relay

구분		데이터
배전계통	전원	154 [kV], j4 [Ω], 100 [MVA]
	변압기	154/22.9 [kV], j15 [%], 45 [MVA]
	선로임피던스	$Z_1 = 3.48+j7.44$ [%/km] $Z_0 = 10.8+j23.6$ [%/km]
지락과전류 계전기	Pick-up current	80 [A]
	TD	3

2.2 초전도 한류기 모델링

본 논문에서는 저항형 초전도 한류기를 사용하였으며, 동작에 관한 모델 식은 아래와 같다[3].

$$R_{SC}(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{quenching} \\ R_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_{quenching}}{T_F}\right) \right]^{\frac{1}{2}} & t_{quenching} \leq t < t_{fault\ clear} \\ a_1(t-t_{fault\ clear}) + b_1 & t_{fault\ clear} \leq t < t_{set\ recovery} \\ a_2(t-t_{set\ recovery}) + b_2 & t_{set\ recovery} \leq t \end{cases} \quad (1)$$

여기서 R_n 은 퀘칭 발생시 초전도 소자가 수렴하는 상전도 저항 크기, T_F 는 퀘칭시 저항이 발생하는 시정수를 나타낸다. $t_{quenching}$, $t_{fault\ clear}$, $t_{set\ recovery}$ 는 각각 퀘칭 발생시간, 고장이 제거되어 1차 회복 시작시간, 설정된 저항크기에서 시작되는 2차 회복 시간을 의미한다.

2.3 소형 분산전원시스템 모델링

분산전원시스템은 간략한 동기발전기를 이용한 모델링하였다. 분산전원시스템의 연계 위치에 따라 순간전압강하 현상을 분석하기 위하여 전기적 모델링을 중심으로 시뮬레이션 하였다[6,7]. 분산전원관련 데이터는 참고문헌 6, 7에 기술되어 있다.

3. 사례연구

본 논문에서는 소형 분산전원이 배전계통에 연계되었을 경우 연계되는 위치에 따라 모선 전압강하에 대하여 분석하였다. 모선 전압강하의 특징은 하나의 선로에 고장발생시 건전선로에서 나타나는 영향으로 고장선로에서 고장이 제거되는 시간과 고장 발생위치에 따라 달라진다. 따라서 분산전원시스템의 연계 위치 및 고장 발생 거리에 따라 나타나는 보호시스템의 영향을 추가로 분석하였다.

분산전원시스템의 연계 위치에 따라 배전계통의 전류 공급 방향이 단방향 또는 양방향의 분포를 갖게 된다. 분산전원시스템이 그림 1과 같이 분산전원이 선로 중간이나 말단에 연계되고 부하 측에서 고장이 발생하면 변전소에서 기여하는 전류에 변화가 발생하여 보호기기의 보호협조나 타 선로 고장시 방향성을 포함해야하는 문제점이 발생한다. 또한 분산전원시스템이 모선에 연계되면 변전소의 고장전류와 합쳐져 고장점으로 유입하므로 보호계전기의 보호협조 검토가 필요하며, 추가적으로 고장전류를 저감하기 위한 방안이 도입되어야 한다[5-8].

본 논문은 이러한 상황에서 분산전원시스템의 연계 위치와 고장전류 저감을 위한 초전도한류기 적용시 고장 발생 거리에 따라 모선 전압의 변화를 분석하였다.

그림 1과 같이 분산전원시스템이 연계된 선로에서 고장이 발생하였을 경우 고장점에서 계산되는 등가 임피던스는 감소하여 전체 고장전류는 증가한다. 그러나 변전소에서 고장점으로 기여하는 고장전류는 감소하여 보호기기의 동작이

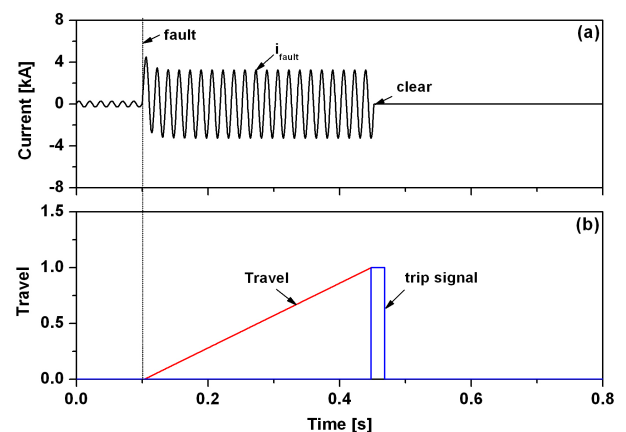


그림 2 분산전원시스템이 연계되지 않았을 경우 (5 km)
(a) 고장전류 파형
(b) OCGR 동작 신호

Fig. 2 Fault current waveform without DG
(a) Fault current
(b) Signals of OCGR

달라지며, 이의 영향으로 건전선로에서 순간전압강하를 경험하게 된다[7,8].

그림 2는 분산전원시스템이 연계되지 않았을 경우 고장전류와 보호기기의 동작을 보여준다. 0.1 s 에 모선에서부터 5 km 지점에서 영구 고장을 모의하였으며, 보호기기는 배전계통의 가장 기본적인 지락 과전류계전기를 모의하였다.

그림 3은 분산전원시스템이 모선에 연계되었을 경우 고장전류와 지락 과전류계전기 동작신호를 보여준다. 모선에서 5 km인 지점에 고장시 분산전원시스템의 모선 연계로 인하여 고장전류의 크기가 증가하는 점을 확인할 수 있다. 또한, 고장거리가 증가하여 모선에서 7 km인 지점의 고장 발생시 선로 임피던스 증가로 분산전원시스템이 모선에 연계되더라도 고장전류가 약간 감소하는 것을 알 수 있다.

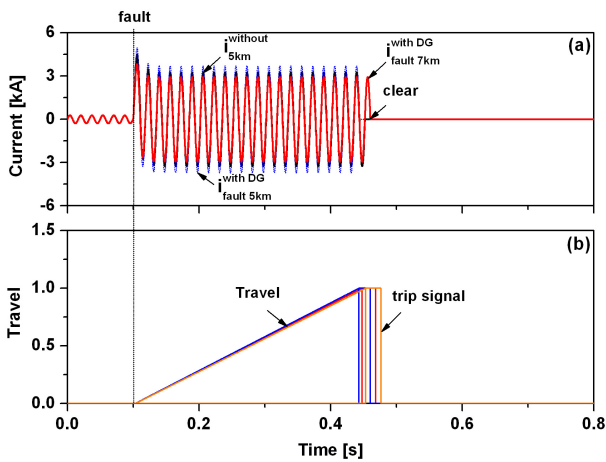


그림 3 SFCL 미설치시 분산전원시스템이 모선에 연계된 경우
(a) 고장전류 파형
(b) OGCR 동작 신호

Fig. 3 Fault current waveform with DG on bus in case that SFCL is not applied
(a) Fault current
(b) Signals of OGCR

본 논문에서는 고장전류를 효과적으로 저감시키기 위하여 초전도한류기를 피더에 적용하였다. 그림 4는 분산전원시스템이 모선에 연계된 상태에서 5 km 고장 발생시 고장전류를 저감하기 위하여 2 Ω의 저항형 초전도한류기를 적용하였을 경우 고장전류와 지락 과전류계전기의 동작 신호를 나타낸다. 초전도한류기의 적용으로 고장전류가 감소된 결과를 얻었다. 이에 반하여 전류의 크기로 동작하는 지락 과전류계전기의 동작은 큰 영향이 받지 않음을 알 수 있다. 이는 한류기 적용 유무에 따른 고장시 등가 임피던스를 비교하면 차이가 매우 적어 고장전류 저감 영향이 많지 않기 때문으로 분석할 수 있다.

그림 5는 분산전원시스템이 선로 중간에 연계되고 부하측에서 고장 발생시 고장전류와 지락 과전류계전기 동작신호를 보여준다. 분산전원시스템의 연계로 고장점으로 유입되는 고장전류의 크기는 증가하지만 보호계전기가 감지하는 고장전류는 분산전원시스템의 영향을 받지 않기 때문에 기존 감지되는 크기보다 감소하게 된다. 따라서 지락 과전류계

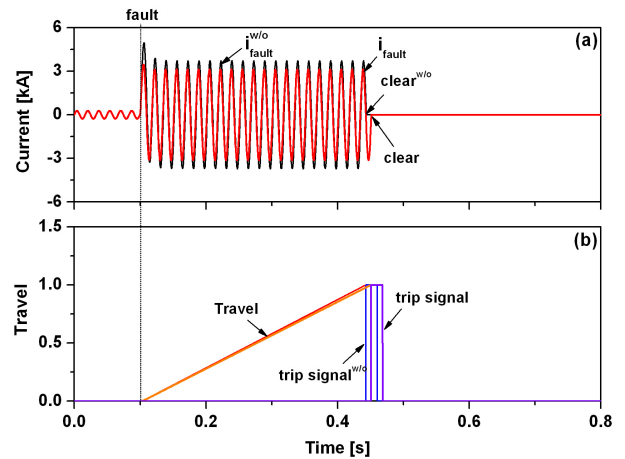


그림 4 SFCL의 선로 설치시 분산전원시스템이 모선에 연계된 경우
(a) 고장전류 파형
(b) OGCR 동작 신호

Fig. 4 Fault current waveform with DG on bus in case that SFCL is applied to feeder
(a) Fault current
(b) Signals of OGCR

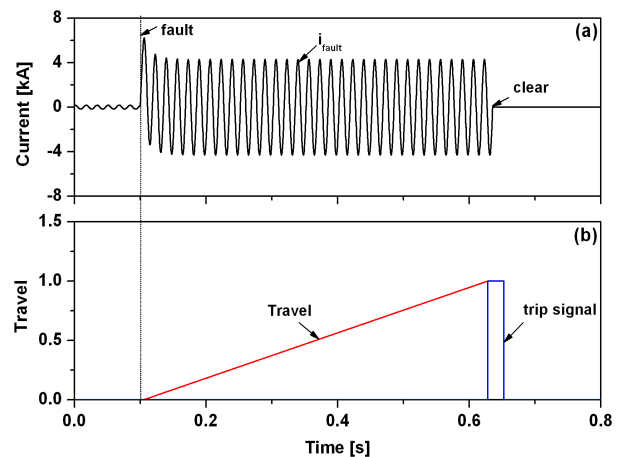


그림 5 SFCL 미 설치시 분산전원시스템이 선로 중간에 연계된 경우 (5 km)
(a) 고장전류 파형
(b) OGCR 동작 신호

Fig. 5 Fault current waveform with DG on middle line in case that SFCL is not applied (5 km)
(a) Fault current
(b) Signals of OGCR

전기의 동작이 지연되는 점을 확인할 수 있다.

그림 6은 분산전원시스템의 연계된 위치가 7 km로 증가하여 부하 측에 가까워진 경우 고장전류 및 지락 과전류계전기의 동작 신호를 보여준다. 분산전원시스템의 연계가 부하 측으로 이동하여 고장 발생 위치도 모선에서 멀어지게 된다. 따라서 증가된 선로 임피던스의 크기에 의하여 고장전류가 감소하고, 이에 따라 지락 과전류계전기에 흐르는 고장

전류도 감소하여 고장 제거 시간이 증가한다. 즉, 분산전원 시스템이 선로에 연계되는 거리가 모선에서 멀어질수록 변전소에서 고장점으로 흐르는 고장전류의 크기가 감소하여 지락 과전류계전기의 동작이 느려짐을 알 수 있다.

초전도 한류기를 선로에 적용하였을 경우 고장전류 및 지락 과전류계전기의 동작신호의 결과를 그림 7에서 보여준다.

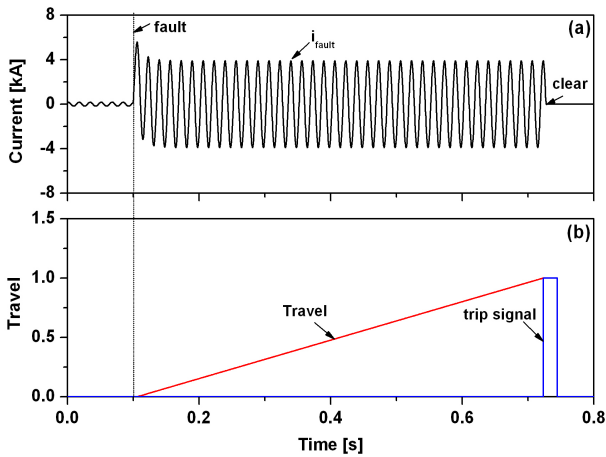


그림 6 SFCL 미 설치시 분산전원시스템이 선로 중간에 연계된 경우 (7 km)
 (a) 고장전류 파형
 (b) OCGR 동작 신호

Fig. 6 Fault current waveform with DG on middle line in case that SFCL is not applied (7 km)
 (a) Fault current
 (b) Signals of OGCR

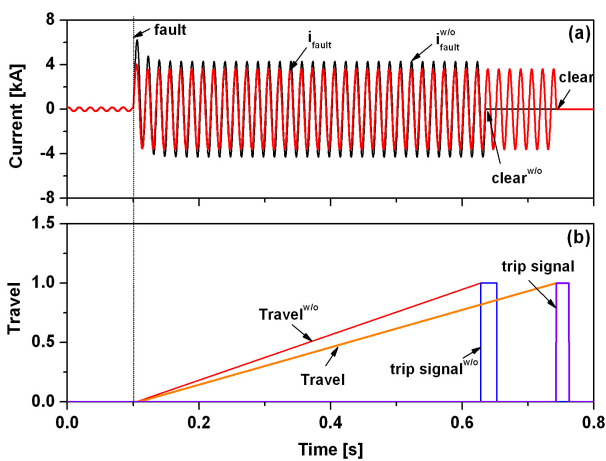


그림 7 SFCL의 선로 설치시 분산전원시스템이 선로 중간에 연계된 경우 (5 km)
 (a) 고장전류 파형
 (b) OCGR 동작 신호

Fig. 7 Fault current waveform with DG on middle line in case that SFCL is applied (5 km)
 (a) Fault current
 (b) Signals of OGCR

그림에서 보면 초전도 한류기의 선로 적용으로 고장 발생 시 고장전류가 저감하는 것을 알 수 있다. 초전도 한류기에서 발생된 저항은 7 km에서 고장이 발생된 경우와 비슷하게 고장점까지의 임피던스를 증가시키고, 그 결과 변전소와 분산전원시스템 사이에서 지락 과전류계전기의 동작을 위한 고장전류에 영향을 미쳐 고장 전류가 감소하여 계전기 동작 시간이 증가함을 확인할 수 있다.

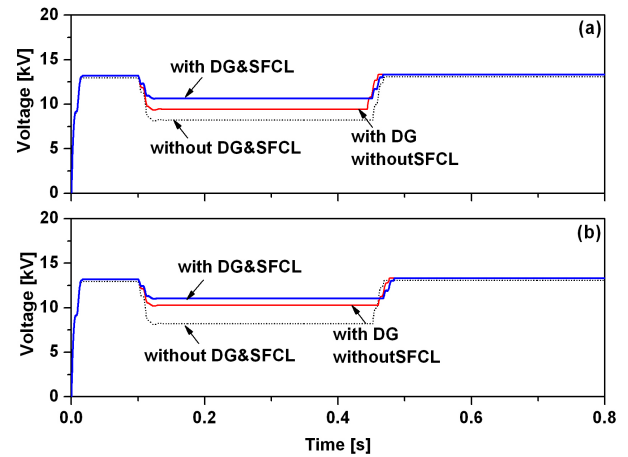


그림 8 분산전원시스템이 모선에 연계된 경우 모선 전압
 (a) 5 km 고장 발생시
 (b) 7 km 고장 발생시

Fig. 8 Bus voltage with DG on bus according to application of SFCL
 (a) Fault case : 5 km
 (b) Fault case : 7 km

그림 8은 분산전원시스템의 모선 연계 및 초전도한류기의 선로 설치 유무에 따른 모선 전압의 변화를 보여준다. 그림 8의 (a)와 (b)에서 고장 발생 거리에 따라 임피던스가 변하여 모선 전압의 크기가 달라짐을 알 수 있다. 그러나 분산전원시스템과 초전도한류기의 적용 여부에 따라 나타나는 전압의 패턴은 동일함을 볼 수 있다. 분산전원시스템의 모선 연계로 연계 전과 등가 임피던스를 비교하면 전원측 임피던스에 비하여 선로측의 임피던스 비율이 증가하게 되어 전압 분배에 따라 선로에 전압이 많이 분배되어 모선 전압이 증가함을 볼 수 있으며, 초전도한류기의 선로 적용으로 추가적인 모선 전압의 전압강하가 개선됨을 확인할 수 있다. 그러나 고장점이 5 km에서 7 km로 증가하여도 분산전원시스템이 갖는 임피던스에 비교하면 선로 임피던스의 변화는 크지 않으므로 보호기기의 동작시간에 큰 변화가 없으므로 순간 전압강하를 경험하는 시간에는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다.

그림 9는 분산전원시스템의 선로 중간에 연계 및 초전도 한류기의 선로 인출점에 설치 유무에 따른 모선 전압을 보여준다. 고장 발생 거리에 따른 순간전압강하가 발생하는 크기에는 고장점까지 시스템 임피던스의 변화가 크지 않아 영향이 적음을 볼 수 있다. 분산전원시스템과 초전도한류기의 적용에 따른 순간 전압의 크기를 비교하면 분산전원시스템을 모선에 연계하였을 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

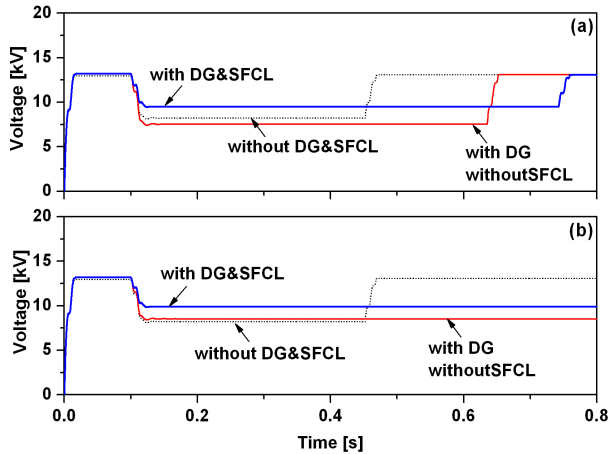


그림 9 분산전원시스템이 선로에 연계된 경우 모션 전압
 (a) 5 km 연계시
 (b) 7 km 연계시

Fig. 9 Bus voltage with DG on middle line according to application of SFCL
 (a) Connection with line : 5 km
 (b) Connection with line : 7 km

이 결과 역시 분산전원시스템의 적용으로 고장점까지 등가 임피던스가 감소하여 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 분산전원시스템의 연계로 모션 전압강하가 개선되었으며, 고장전류 제한을 위한 초전도한류기의 선로 인출점 적용으로 추가적인 모션의 전압강하를 개선할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 순간전압강하를 평가하는 방안으로 전압강하의 지속시간을 분석해보면, 그림 7과 같이 연계위치가 증가하면서 고장전류의 감소로 보호기기의 동작의 지연으로 오랜 시간동안 전압강하를 야기시킴을 알 수 있다. 이때, 분산전원시스템의 선로 중간 연계시 연계 거리가 증가하면 변전소와 분산전원시스템사이의 고장전류 분배에 따라 보호기기가 동작하지 못 하여 고장이 제거되기까지 순간전압강하를 경험하게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 분산전원시스템의 계통 적용시 위치에 따라 고장전류 및 보호기기의 동작을 시뮬레이션하여 각각의 사례에서 발생하는 순간전압강하 영향에 대한 결과를 분석하였다. 분산전원시스템이 모션에 도입되면 고장전류의 크기에 크게 기여하며, 모션 순간전압강하에 대한 변화는 기존 초전도한류기를 적용하였을 경우와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 선로 중간에 분산전원시스템을 적용하면, 적용되는 거리에 따라 변전소와 분산전원시스템 사이의 전류가 분배되어 보호기기의 동작에 영향을 미치며, 모션에서 발생하는 순간전압강하의 지속시간에 영향을 주는 결과를 확인하였다. 분산전원시스템의 도입은 배전계통 운영에 도움이 되며, 초전도한류기의 선로 도입시 고장 발생에 의한 순간전압강하가 개선되는 장점을 갖지만, 적용 위치에 따라 순간전압강하의 지속시간에 영향을 주는 보호기기의 동작을 추가적으로 분석해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2011-0013024)

참 고 문 헌

- [1] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, "Towards the superconducting fault current limiter," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 801-808, 1991.
- [2] Y. Jiang, S. Dongyuan, D. Xianzhong, T. Yuejin, and C. Shijie, "Comparison of superconducting fault current limiter in power system," in IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 43 - 47, 2001.
- [3] J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, "Comparative Analysis on Current Limiting Characteristics of Hybrid Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) with First Half Cycle Limiting and Non Limiting Operations", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 659-663, 2012.
- [4] KETEP, "Green-energy road map", 2009.
- [5] W. W. Jung, H. J. Lee, S. C. Kwon, W. K. Chae, "Application of Directional Over Current Protection Schemes Considering the Fault Characteristics in the Distribution System with Dispersed Generation", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 24, No. 9, pp. 97-107, 2010.
- [6] J. H. Choi, S. K. Jung, D. W. Choo, N. K. Kim, S. S. Son, J. C. Kim, "Advanced Protective Coordination Schemes of Utility Interconnected Cogeneration System", Trans. KIEE, Vol. 49A, No. 6, pp. 280-288, 2000.
- [7] M. H. Kim, J. S. Kim, J. F. Moon, S. H. Lim, J. C. Kim, J. K. Lee, "Analysis on Recloser-Fuse Coordination in a Power Distribution System linked Small Scale Cogeneration System with Superconducting Fault Current Limiter", Trans. KIEE, Vol. 59, No. 3, pp. 499-505, 2010.
- [8] M. H. Kim, J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, "A Study on the Protection of Power Distribution System with the Distributed Generator and Superconducting Fault Current Limiter", Trans. KIEE, Vol. 61, No. 9, pp. 1226-1231, 2012.

저 자 소 개



문 종 필 (文 鍾 必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2009년~현재 한국교통대학교 전기공학과 부교수

Tel : 043-841-5146

Fax : 043-841-5140

E-mail : moon@ut.ac.kr



손 진 근 (孫 珍 勗)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2002. 2~2003. 2 일본 가코시마대학 전기공학부 Post-doc. 2009. 1~2010. 2 Michigan State University 방문교수. 2013년 당학회 협력이사. 1997년~현재, 가천대학교 전기공학과 교수.

Tel : 031) 750 - 5711

E-mail : shon@gachon.ac.kr