

EMTP를 이용한 전력계통 연계 분산전원의 영향 해석

여상민, 김철환
성균관대학교

이기식 김훈식
단국대학교 GS 건설

Analysis of Impact of the Distributed Generation interconnected with Power System using EMTP

S.M. Yeo, C.H. Kim
Sungkyunkwan University

K.S. Lee H.S. Kim
Dankook University GS E & C C.

Abstract - 분산전원의 등장은 전체 전력계통의 안정도 및 전력품질 등에 영향을 미친다. 이러한 분산전원에 의한 영향은 고장, 전력 공급의 높은 신뢰성, 전압 새그 완화 등에 의한 긍정적인 영향과 보호계전기의 정정 변화 및 그에 따른 오동작과 같은 신뢰성 감소의 부정적인 영향으로 구분하여 볼 수 있다. 그러나 분산전원이 존재하는 전력계통의 해석은 다양한 분산전원의 종류와 특성에 따른 변화에 의해 더욱 어려워진다.

본 논문에서는 동기발전기 모델을 사용하여 분산전원을 모델링하였으며, 전력계통 과도현상 해석 프로그램인 EMTP를 사용하여 분산전원이 존재하는 배전계통을 모의하였다. 또한, 분산전원의 위치, 용량 등의 차이에 따라 계통에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

1. 서 론

전력계통이 복잡해짐에 따라 기존의 아날로그 계전기들은 요구되는 성능을 따라가기 어려워졌다. 반면, 이에 반해 최근의 디지털 보호계전기들은 속도나 정확도 면에서 좋은 성능을 제공하고 있다. 예를 들어 아날로그 계전기에서는 어려웠던 복잡한 수학적 계산이나 여러 신호 처리들을 보다 쉽게 처리할 수 있어 다양한 새로운 보호계전 기법들을 적용할 수 있게 되었다. 그러나 새로운 보호계전 기법들을 적용함에 있어, 충분한 시험을 거치지 않는다면, 오히려 계전기의 오동작의 원인이 된다[1].

최근 다방면에서 고려되고 있는 분산전원은 여러 가지의 장단점을 지니고 있다. 특히 분산전원이 존재하는 계통에서 고장이 발생할 경우, 계통에는 분산전원에 의한 고장 전류가 추가로 흐르게 되며, 이는 계전기의 오동작을 야기하게 된다. 또한 심각한 경우, 계통의 안정도의 감소를 불러오게 된다. 배전계통에 연결된 분산전원은 계통 전압 변화, 고장레벨의 증가 등의 다양한 영향을 갖는다[2-6].

본 논문에서는 보호 전략의 관점에서 분산전원이 계통에 미치는 영향을 해석하고 이해하기 위해 분산전원이 포함된 배전계통에 대해 EMTP를 사용하여 다양한 시스템 조건을 모의하였다. 따라서, 본 논문에서는 모의 결과를 제시하고, 분산전원의 영향을 해석하고자 한다.

2. 분산 전원

CIGRE(The International Conference on Large High Voltage Electric Systems)와 CIREN(The International Conference on electricity Distribution Networks)에서 조사한 바에 의하면 분산전원은 동기발전기 또는 유도발전기, 전력전자 장치 등으로 이루어지며, 다음과 같은 몇 개의 공통된 특징을 갖는다[2, 3].

- (1) 중앙 급전 계획에 포함되지 않음
- (2) 중앙 급전에 포함되지 않음
- (3) 일반적으로 50~100MW 보다 적은 용량
- (4) 보통 배전계통에 연결됨

또한 분산전원을 권장하는데 있어 다음의 몇 가지 이유를 제시하고 있다[2].

- (1) 가스 방출의 감소
- (2) 에너지 효율 또는 에너지의 재활용
- (3) 전력산업 구조개편 또는 경쟁 정책
- (4) 에너지원의 다양화
- (5) 소형 발전기가 설치될 적절한 장소를 찾기 쉬움

전력계통 구성에 대한 여러 고려사항 중 환경적 영향에 의해, 분산전원은 열병합 발전과 풍력, 소수력, 태양광, 지열 등의 재생에너지로 분류된다. 분산전원의 다른 분류 형태로는 동기발전기, 유도발전기 또는 인버터 시스템과 같은 발전의 형태에 따른 것이다.

일반적으로 분산전원은 배전계통에 연결되어 수송가에 전력을 공급하기 위해 사용된다. 그러나 계통의 상태에 따라서는 분산전원에 의한 전력이 역송되는 경우가 발생할 수도 있기 때문에 타 수송가의 전력 품질이 변화를 나타내는 것을 확인하는 것은 매우 중요하다. 다음 그림 1은 분산전원이 포함된 배전계통의 조류를 도시한 것이다.

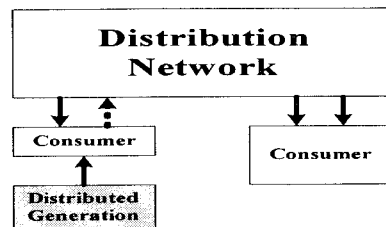


그림 1. 배전계통에서의 조류

본 논문에서는 모의를 위해 EMTP를 사용하여 동기발전기를 구현하였으며, 다양한 조건의 고려를 위해 전원의 용량을 다양하게 변화시키면서 모의를 수행하였다.

3. 시뮬레이션 및 결과

3.1. 모델 계통

배전계통 모의를 위한 모델 계통은 다음 그림 2에서 보인 것과 같다. 모델 계통은 5개의 모선, 3개의 변압

기, 3개의 부하를 가진 배전계통이다. 총 모의시간은 1.5초이며, 샘플링 주파수는 3840[Hz]이다.

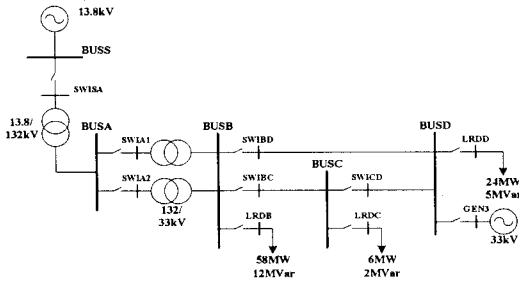


그림 2. 최대 부하에서의 단선도

모델계통은 참고문헌 [2]에 소개된 것으로 EMTP를 사용해 구현하였으며, 모선 BUSS는 slack 모선으로 선택되었다. 모선 BUSS의 발전기는 시스템에 평형의 유효전력을 계통에 공급할 것이다. 본 논문에서는 이 발전기는 이상적인 전원으로 구현하였으며, 분산전원은 동기발전기를 사용하여 구현하였다. 표 1은 각 선로, 변압기들의 임피던스이다.

표 1. 모의 계통의 선로 정수

From bus	To bus	Type	Resistance	Reactance
BUSS	BUSA	transformer	0.0	0.06670
BUSA	BUSB	transformer	0.00994	0.20880
BUSA	BUSB	transformer	0.00921	0.21700
BUSB	BUC	line	0.04460	0.19170
BUSB	BUSD	line	0.21460	0.34290
BUC	BUSD	line	0.23900	0.41630

모의는 다음의 세 가지 시스템 조건에 대하여 수행되었다.

- Case 1 : 최대 부하, 분산전원이 없는 상태
- Case 2 : 최대 부하, 모선 BUSD에 분산전원 존재
- Case 3 : 최소 부하, 모선 BUSD에 분산전원 존재

그리고, 고장 조건하에서의 분산전원의 영향을 해석하기 위하여 고장을 모의하였다. 표 2는 고장 유형과 고장 위치를 보여주고 있으며, 고장 발생 시간은 0.25[sec], 고장 지속시간은 0.25[sec]이다.

표 2. 모의 고장 유형 및 고장 위치

고장 유형	1선지락고장 (SLGF), 3상 고장
고장 위치	BUSA, BUC lineBD (line between BUSB and BUSD)

최소 부하 상태는 최대 부하의 10%로 계통 구성은 그림 2와 같다.

3.2 Case 1

각 모선과 선로에서 전압, 전류를 측정하여 RMS를 계산하였으며 단위법을 사용하였다. baseMVA는 50MVA이다.

다음 표 3은 정상상태에서의 각 모선 전압이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 계통 전원으로부터 거리가 먼 모선일수록 각 모선에서의 부하와 선로 임피던스에 의한 전압강하로 인해 1[pu] 보다는 낮은 전압의 크기를 가지는 것을 볼 수 있다. 말단에 위치한 모선 BUSD의 경우 약 0.98[pu]의 상대적으로 낮은 값을 가지고 있다.

표 3. 정상상태에서의 각 모선 전압

Bus	BUSS	BUSA	BUSB	BUC	BUSD
Voltage [pu]	1.0	1.0	0.994	0.991	0.982

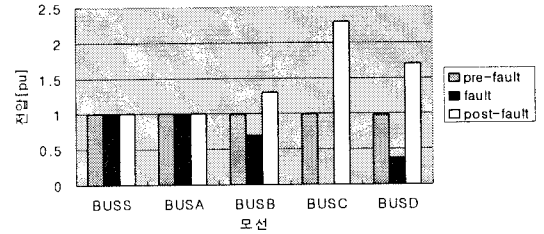


그림 3. 1선지락 고장에서의 각 모선 전압

그림 3은 모선 BUC에서 약 0.25초의 지속시간을 갖는 1선지락 고장이 발생하였을 경우의 각 모선 전압을 나타낸 것이다. 고장이 끝난 후에도 전압은 원래의 값으로 회복되고 있지 않으며, 오히려 보다 큰 값으로 증가하고 있다. 다음 그림 4는 각 스위치를 통해 흐르는 전류를 보이고 있다.

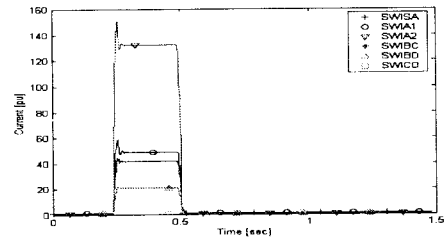


그림 4. 1선지락 고장에서의 각 선로 전류

다음 그림 5-6은 동일 모선 BUC에서 3상고장이 발생한 경우의 각 모선의 전압 파형과 스위치를 통해 흐르는 전류 파형이다.

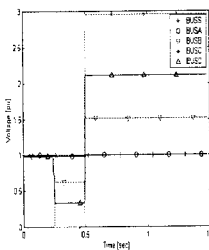


그림 5. 3상 고장에서의 각 모선 전압

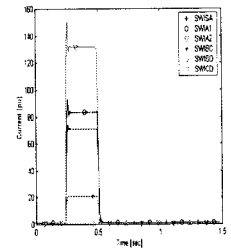


그림 6. 3상 고장에서의 각 선로 전류

그림 5-6에서 볼 수 있듯이 고장이 발생하면 전류는 크게 증가하게 된다. 또한 고장지점과 가까울수록 고장 후의 전압 크기가 큰 것을 볼 수 있다. 다음 그림 7은 3상고장이 발생한 경우의 모선 BUSD에서의 전압 파형이다. 고장 후의 전압이 불평형을 이루고 있음을 볼 수 있다.

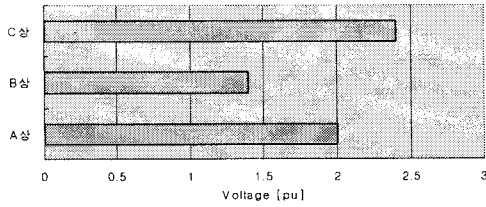


그림 7. 3상 고장에서의 모선 BUSD의 각상 전압

3.3 Case 2

다음 그림 8은 BUSC에서 1선지락 고장이 발생한 경우의 각 모선에서의 전압 파형이며, 그림 9는 고장 후의 전류 파형이다.

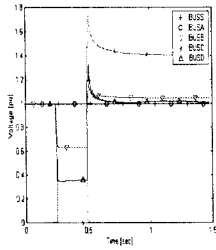


그림 8. 1선지락 고장에서의 각 모선 전압

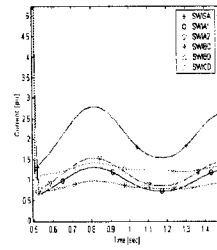


그림 9. 1선지락 고장에서의 각 선로 전류

분산전원이 없는 경우인, 그림 3, 4에서와는 달리 고장이 끝난 후의 전압은 고장모선을 제외하고 1.1pu 이하의 크기로 고장 전의 모선 전압을 회복하게 된다. 또한 전류는 고장이 지속되는 기간에는 거의 유사하게 흐르지만, 고장이 끝난 후에는 동기발전기에 의해 좀더 큰 전류가 흐르게 된다.

다음 그림 10은 3상고장이 발생한 경우의 전압 파형이다. 1선지락 고장에서와 마찬가지로 고장모선을 제외한 다른 모선에서의 전압은 원래의 전압을 회복하는 경향을 보이고 있다. 단, 차이점은 3상고장은 고장용량이 크기 때문에 분산전원이 연결되어있는 모선 BUSD에서의 power swing 현상을 보이고 있으며, 다른 모선의 전압도 1선지락 고장에 비해 큰 전압값으로 수렴하고 있다.

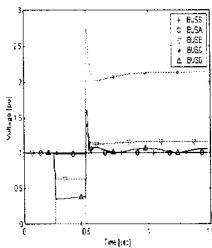


그림 10. 분산전원이 있는 경우의 3상 전압

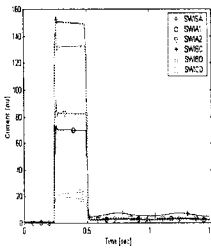


그림 11. 3상고장에서의 각 선로 전류

다음 그림 11은 각 스위치를 통해 흐르는 전류를 보이고 있다. 동기발전기에 의해 공급되는 전력에 의해 전류의 변화 형태에도 차이를 가지게 된다.

다음 그림 12는 분산전원이 없는 경우와 모선 BUSD에 분산전원으로써 동기발전기가 연결된 경우에 대해, 모선 BUSC에서 발생된 일시적인 1선지락 고장의 영향을 보여주고 있다. 그림 11에서 나타난 바와 같이 분산전원이 존재하게 되면, 각 모선의 전압은 1.0pu에 근사하게 회복된다.

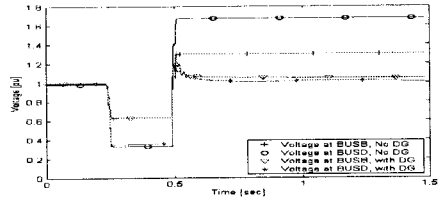


그림 12. 분산전원 존재에 따른 부하의 전압 비교

3.4 Case 3

전체 계통의 부하가 최대 부하의 10% 상태일 때의 계통 상황에 대하여 모의를 수행하였다. 다음 그림 13-14는 각각 1선지락 고장이 발생하였을 경우의 각 모선의 전압 파형과 스위치를 통해 흐르는 전류 파형이다.

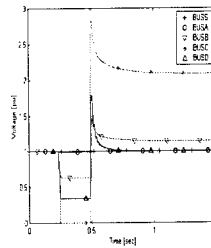


그림 13. 1선지락 고장에서의 각 모선 전압

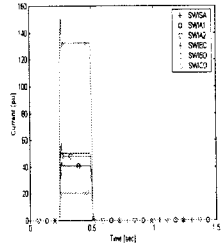


그림 14. 1선지락 고장에서의 각 선로 전류

그림 14는 고장 전의 전류는 거의 0pu에 가까운 매우 작은 전류가 흐르는 것을 보여준다. 그러나 고장이 지속되는 동안에는 앞선 그림 5, 7에서와 거의 같은 크기의 전류가 흐르게 된다.

다음 그림 15는 앞서 언급한 각 3가지의 모의 유형에 대해 모선 BUSC에서 1선지락 고장이 발생한 경우의 모선 BUSD에서의 전압을 보이고 있다. 동기발전기에 의해 모선 전압은 1.0pu로 회복되어 공급되는 것을 알 수 있으며, 계통의 부하가 최소인 경우 고장 후의 전압이 최대 부하인 경우에 비해 보다 빨리 수렴하는 것을 알 수 있다.

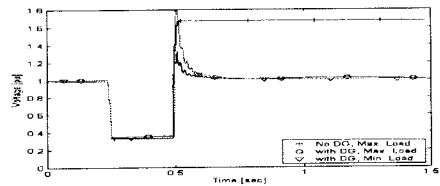


그림 15. 각 모의 조건에 따른 전압의 변화 비교

3.5 결과

BUSA, 또는 BUSB와 BUSD 사이의 선로와 같은 다른 위치에서 고장이 발생할 경우에도 유사한 결과를

볼 수 있다. 다음 그림 16은 최대 부하 상태에서 모션 BUSD에 동기발전기가 연결된 계통 상황에서의 여러 고장에 따른 모션 BUSB, BUDD에서의 전압을 보여준다. 분산전원으로부터 먼 모선일수록 고장 후의 전압이 고장 전 전압으로 회복되는 정도는 적어진다.

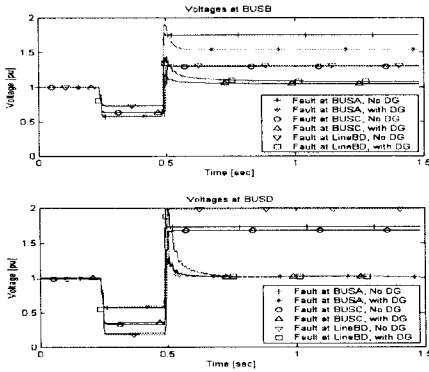


그림 16. 분산전원의 존재와 고장위치에 따른 비교

다음 표 4는 다른 고장 위치에서의 전압과 전류의 RMS값이다. 각 값은 고장이 제거된 후, 측정되었으며 최대부하 상태에서 분산전원이 있는 경우에 대한 값이다.

표 4. 각 고장 유형에 따른 전압과 전류

Voltage /Current	Normal Condition	F.L.*(BUSA)		F.L.*(lineBD)	
		SLGF	3 ϕ fault	SLGF	3 ϕ fault
BUSA [pu,V]	1.00	3.20	3.57	1.00	1.00
BUSB [pu,V]	1.00	1.54	1.65	1.08	1.10
BUSC [pu,V]	1.00	1.29	1.36	1.04	1.08
BUSD [pu,V]	1.00	1.01	1.1	1.01	1.07
lineBC [pu,I]	0.77	0.94*1.21	3.92*4.85	0.76*1.00	2.60*3.25
lineBD [pu,I]	1.04	1.43*1.74	5.89*7.01	1.16*1.43	3.90*4.68
lineCD [pu,I]	0.71	0.99*1.12	3.93*4.77	0.80*0.97	2.77*3.20

* F.L.: Fault Location
 ** Voltage: maximum value among phase A, B, C
 *** Current: from minimum value to maximum value

분산전원이 있는 BUSD에서의 전압은 약 1.01~1.10pu의 값을 보인다. 그러나 전류는 큰 값을 가지며, 또한 진동한다. 특히 전류는 고장이 지속되는 동안에는 매우 큰 값을 가진다. 이러한 현상은 차단기의 용량과 관계가 있으며, 차단기 실패를 가져온다.

다음 그림 17은 고장지속시간에 따른 모션 BUSD에서의 A상 전압을 보이고 있다. 고장은 마찬가지로 1선 지락 고장이다. 그림에서 보인 바와 같이 고장이 가능한 빨리 제거될수록 전압은 빨리 회복되며, 발전기도 안정적으로 운전하게 된다. 만약 고장이 특정 시간 이상 지속하게 되면, 동기발전기는 탈조하게 되며, 계통은 상당한 영향을 받게 된다.

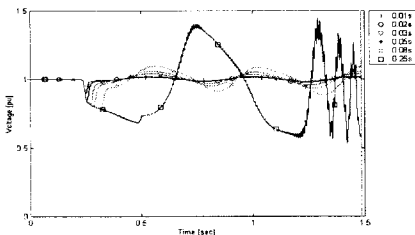


그림 17. 고장의 지속 시간에 따른 전압의 변화

그림 17을 통해 알 수 있듯이 고장 지속시간이 약 0.02-0.03초(약 1~2 주기) 이내라면 고장 후의 전압은 거의 고장전의 상태로 회복된다. 그러나 고장 지속시간이 길어지게 되면, 전압의 진동은 점차 심해지고, 심지어 동기발전기는 탈조될 수도 있다.

4. 결론

보통, 고장이 발생하면 전류는 정상상태의 수배로 커진다. 그래서 전력계통 기술자는 고장을 제거하기에 적절한 차단기를 선택한다. 그러나 만약 전력계통에 분산전원이 연결되면, 고장전류는 분산전원이 없는 경우보다 커질 것이며, 전류는 고장이 제거된 후 진동할 것이다. 또한, 경우에 따라 동기발전기는 탈조될 수도 있다.

그래서, 본 논문에서는 분산전원이 있거나 없는 경우의 배전계통을 모의하고, EMTP를 사용하여 시스템이 받는 영향을 해석하였다. 이 모의는 고장이 있을 때 분산전원의 심각한 영향을 보여준다.

그러므로 전력계통 기술자는 새로운 차단기를 선택하거나 새로운 보호 전략을 세울 것이다. 예를 들면, 고장이 발생하였을 때, 고장을 가능한 빨리 제거하거나 분산전원을 고립시키는 것이다. 본 논문의 모의 결과는 기초적인 것으로서, 유도발전기나 전력전자 장치 등에 의한 분산전원의 고려는 물론 보다 복잡한 형태의 계통에 대한 모의는 물론 실제 계전 알고리즘의 적용을 통한 보다 실제적인 모의를 수행해 나가고자 한다.

[참고 문헌]

- [1] Kim C.H., Lee M.H., Aggarwal R.K., Johns A.T., "Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines", IEEE Trans Power Systems, Vol. 15, No. 1, 2000, 9-15.
- [2] Nick Jenkins, Ron Allan, Peter Crossley, David Kirschen, Goran Strbac, "Embedded Generation", IEE Power and Energy Series, 2000.
- [3] Schweer, A., "Special report for Session 3, CIGRE Symposium on Impact of demand side management, integrated resource planning and distributed generation", Neptun, Romania, 1997, Paper no. 300-00.
- [4] J. V. Milanovic, R. Gnativ, "Characteristics of Voltage Sags in Radial Networks with Dynamic Loads and Embedded Generators", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, 2001, vol. 1.
- [5] A. Girgis, S. Brahma, "Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System", Power Engineering, LESCOPE '01, 2001, 115-119
- [6] N.W. Miller, R.A. Walling, A.S. Achilles, "Impact of Distributed Resources on System Dynamic Performance", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES, 2001, 951-952.