

모터부하 특성에 따른 국내 전력계통의 전압 지연 회복 현상 분석

An Analysis of Delayed Voltage Recovery Phenomenon according to the Characteristics of Motor Load in Korean Power System

이 윤 환[†]
(Yun-Hwan Lee)

Abstract – FIDVR(Fault Induced Delayed Voltage Recovery) is a phenomenon that recovery of the system voltage level delays after the fault. Cause of FIDVR phenomenon is motor load characteristic about voltage and reactive power. In low voltage condition, the motor go to stall state that consume large amount of reactive power. As a result, the voltage recovery problem is that of repeated occurrences of sustained low voltage following faults on the system. In this paper, analysis the characteristics of the motor load. And using the korean power system actual data, perform a case studies to voltage delay recovery phenomenon alleviation method. Change of each parameters by analyzing the effect on system and selecting an influence parameter. In addition, dynamic characteristic analysis of the resulting difference in the proportion by the motor load in power systems, considering the effect on the voltage stability.

Key Words : Fault induced delayed voltage recovery, Induction motor stall, Load characteristic, Voltage instability

1. 서 론

최근의 전력계통은 빠른 산업화와 기술발전에 의해 지속적으로 부하수요가 증가하고 있으며, 안정적인 전력의 공급과 더불어 높은 수준의 전기품질이 요구되고 있다. 하지만 계통 내에는 다양한 부하 및 설비가 복잡하게 분포되어 있어 효율적 운영을 위한 감시, 제어가 어려운 실정이다. 이러한 전력계통의 복잡화는 다양한 외란에 노출되는 구조적인 취약성을 내포하여 전압불안정을 야기할 수 있다. 신재생에너지의 보급 확대에 따른 새로운 설비가 계통에 연계 및 투입될 경우 현재 시스템과의 안정성과 신뢰성을 저하하지 않는 것이 무엇보다도 중요하다.

전력시스템의 부하는 상당부분 모터(유도전동기)로 이루어져 있으며, 최근에는 모터부하를 활용하는 HVAC 기기의 급증으로 인해 하계 및 동계의 최대부하수준에서 모터부하의 비율이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 계통 내 모터부하의 비율이 낮았던 초기에는 전압강하와 같은 계통 사고 발생 시 계통에서 분리하였다가 전압이 회복되어 복구되는 시점에 재연계하는 운전방식에 문제가 없었다. 하지만 모터부하가 급격히 증가하면서 계통 사고 시 전압강하에 의해 유도전동기의 회전수가 감소되면 사고차단 후 증속을 위해 기기적인 특성인 재기동 전류에 의한 전압 지연 회복 현상이 발생할 수 있다. 계통 내 모터부하의 비율이 낮은 경우에는 전압의 회복 속도가 빠르게 나타나지만 모터부하의 비율이 높을 경우 전압의 회복 속도가 느리게 나타나거나 전압붕괴로 이어질 수 있다. 또한 계통의 전압이 낮아져 모터가 실속(Stall) 되기 시작하면

무효전력을 급격하게 소모하여 계통의 안정화에 영향을 미칠 수 있다[1-3].

이러한 FIDVR(Fault Induced Delayed Voltage Recovery) 현상은 최근 전압안정도 이슈로 논의되고 있으며, 세계 여러 지역에서 관찰되어 보고되고 있다. 이 현상은 사고 제거 후에 모터부하가 가지는 운동에너지의 기기적인 특성에 의해 발생하는데 NERC 보고서에서는 다음과 같이 정의하고 있다. 사고 후 전압수준이 현저히 낮은 상태를 몇 초 동안 유지하는 현상, 사고 제거 후 사고 전 전압의 90%로 회복되지 않는 현상, 사고 후 전압 회복이 2초 이상 지연되고, 안정한 전압 레벨로 회복되지 않는 현상이라고 언급하고 있다. FIDVR 현상은 모터부하의 실속에 의하여 발생하는데, 대형 모터의 경우는 높은 관성에 의한 자체 보호 기능을 가지고 있으나, 가정용 에어컨 등과 같은 소형 모터 부하의 경우 계통에 사고가 발생하게 되면 낮은 관성에 의하여 계통에서 스스로 분리되지 못하여 계통의 무효전력을 소모하여 계통의 전압불안정에 영향을 미치게 된다. 또한, 모터 부하의 비율이 증가하면 전압 지연 회복(FIDVR) 현상이 더욱 심각하게 발생하며, 전력 피크 시에 모터부하가 실속하게 되면 무효전력 부족에 따른 영향이 인근 지역으로 파급되어 광역정전을 발생시킬 수 있다[4].

이에 본 논문에서는 모터부하의 특성을 분석하고 이를 바탕으로 실제 국내 전력계통 데이터를 이용하여 전압 지연 회복 현상을 분석하고, 계통을 안정화 시키는 방안인 부하 차단 방안을 적용한 사례연구를 수행한다. 또한, 각 파라미터의 변화가 계통에 미치는 영향력을 분석하고, 계통 내 모터부하가 차지하는 비율에 따른 동특성 해석 결과의 차이를 관찰하여 전압안정도에 미치는 영향을 고찰한다.

[†] Corresponding Author : Coon Tec, Korea

E-mail : yunan2@naver.com

접수일자 : 2016년 7월 29일

최종완료 : 2016년 8월 16일

2. 모터부하의 특성 분석

일반적으로 계통 내에서 ZIP모델만을 고려하여 동특성을 검토하는 경우, ZIP모델의 특성상 전압이 감소하면 부하량이 감소하여 대부분 계통이 안정해지는 특성이 있다. 동적해석을 수행할 때 ZIP모델만을 반영하여 검토하게 되면 조류계산이 발산하는 경우의 데이터라도 동특성 해석에서는 안정한 경우가 일반적으로 나타날 수 있다. 하지만 모터부하의 고려 여부에 따라 계통 검토 결과에서 많은 차이를 보이게 된다. 모터부하가 고려될 경우 부하의 회복특성이 반영되어 전압불안정 현상 발생 시에 전압이 서서히 떨어지기 시작하여 일정 수준이 되면 급격하게 떨어지면서 계통 불안정 현상을 야기한다. 이러한 현상은 모터부하의 특성상 전압이 낮아지면 무효전력 소모량이 더 커지기 때문에 나타나게 된다. 모터부하는 전압이 낮아짐에 따라 부하회복 특성을 가져 점차적으로 더 많은 무효전력을 흡수하게 되고 이는 더 많은 전압 강하를 나타내며 결국은 전압불안정 현상을 야기한다. 모터부하가 무효전력을 서서히 더 많이 흡수하게 되면 전압이 서서히 감소하다가 최대전력 전달 한계점이 되면 전압이 급격하게 감소하며 계통이 불안정해지는 경우도 발생할 수 있다. 또한, 계통의 심각성이 매우 커서 초기에 전압이 붕괴되는 경우도 있으므로 빠른 제어 조치가 수행되지 않으면 계통의 불안정 현상을 방지할 수 없다. 실제 계통은 모터부하를 포함하고 있으며 문헌 및 논문에 의하면 계통 전체의 무효전력을 소모하는 부하의 40~60%는 모터부하라고 언급하고 있다[5-7].

모터부하의 비율이 계통 내에 차지하는 비율이 높은 편이므로 모터부하를 고려하지 않고 계통을 검토하기에는 한계가 있음을 시사한다. 모터부하가 고려될 경우 계통의 안정화에 영향을 미치게 되는데, 다음 그림 1은 모터부하가 있는 경우와 없는 경우의 전압파형을 비교한 결과를 보인다.

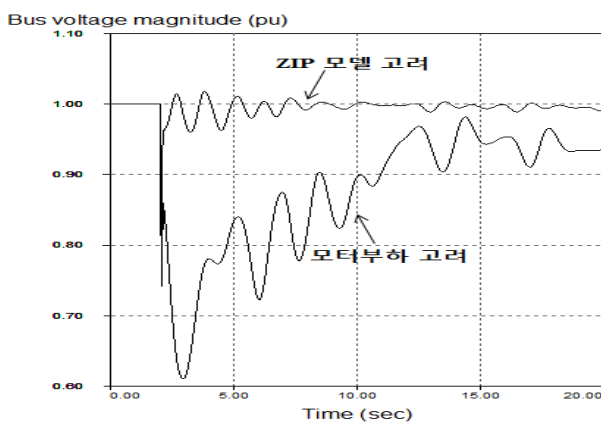


그림 1 모터부하 고려 유무에 따른 전압 파형
Fig. 1 Voltage variation with/without considering of the motor load

모터부하가 없는 경우에는 사고 후 계통의 전압이 진동(Oscillation) 하다가 안정화되는 파형을 보이나, 모터부하가 있는 경우에는 상대적으로 진동 폭이 크게 감소함을 볼 수 있다. 이것은 모터부하가 회전기로서 댐핑(Damping) 특성을 가지고 있기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

3. 모터부하의 파라미터 특성 및 계통 영향성 분석

3.1 모터부하의 기본 파라미터

국내계통에서는 아직 모터부하에 대한 정확한 모델링이 이루어져 있지 않았으므로, 해외 문헌상에 있는 파라미터 값을 참고하여 각 파라미터의 변화를 통한 계통에 미치는 영향력을 분석한다. 모터부하의 기본적인 파라미터는 고정자와 회전자의 저항 및 리액턴스, 관성 상수로 이루어진다. 다음 표 1은 해외 문헌상에서 제시한 파라미터 값을 나타낸다[8-10].

표 1 해외문헌에서 제시한 파라미터
Table 1 Literature presented parameters

파라미터	문헌 1	문헌 2	문헌 3
고정자 저항 (Rs)	0.035	0.031	0.035
고정자 리액턴스 (Xs)	0.094	0.120	0.178
회전자 저항 (Rr)	0.048	0.036	0.032
회전자 리액턴스 (Xr)	0.163	0.320	0.177
관성 상수 (H)	0.930	0.700	1.457

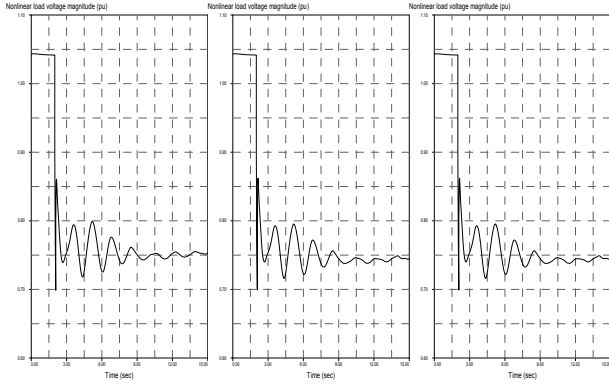
위의 표에서 보듯이 변화시킬 파라미터는 Rs, Xs, Rr, Xr, H의 값으로 총 5개의 파라미터가 있다. 일반적으로 사용되는 모터부하의 파라미터 값은 소형 및 대형의 용량별로 구분하여 나타내기도 한다. 하지만 본 논문에서는 해외문헌에서 제시한 파라미터값을 기준으로 어떠한 파라미터가 계통에 많은 영향력을 미치는지에 대하여 분석한다[8-10].

3.2 모터부하 파라미터의 계통 영향력 분석

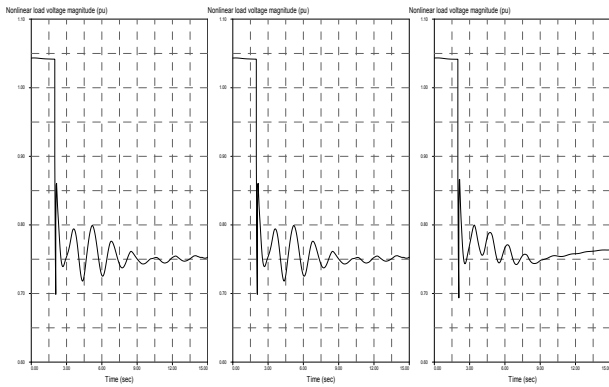
모터부하 파라미터의 최대값과 최소값을 분류하여 계통에 영향력 분석을 위한 조건을 설정하였다. 파라미터 변화에 따른 다양한 결과를 얻어내기 위하여 위에서 언급한 각각의 문헌별 파라미터 값을 활용하여 최소값, 최소값과 최대값의 평균인 중간값, 최대값으로 분류하여 적용하였다. 파라미터가 계통에 미치는 영향력을 분석하기 위해 4가지 파라미터를 고정시켜 놓고 나머지 1개에 대해서 최소값, 중간값, 최대값을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 다음 표 2는 본 논문에서 적용한 시뮬레이션 파라미터값을 나타낸다.

표 2 시뮬레이션 파라미터 적용값
Table 2 Applied the parameter of simulation

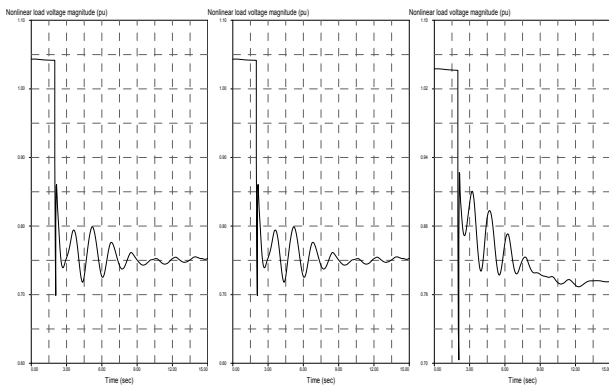
파라미터	최소값	중간값	최대값
고정자 저항 (Rs)	0.031	0.033	0.035
고정자 리액턴스 (Xs)	0.094	0.136	0.178
회전자 저항 (Rr)	0.032	0.040	0.048
회전자 리액턴스 (Xr)	0.163	0.242	0.320
관성 상수 (H)	0.930	1.194	1.457



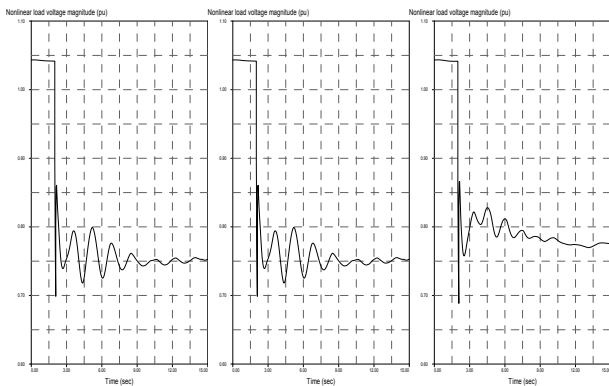
(a) Rs 최소값, 중간값, 최대값 적용



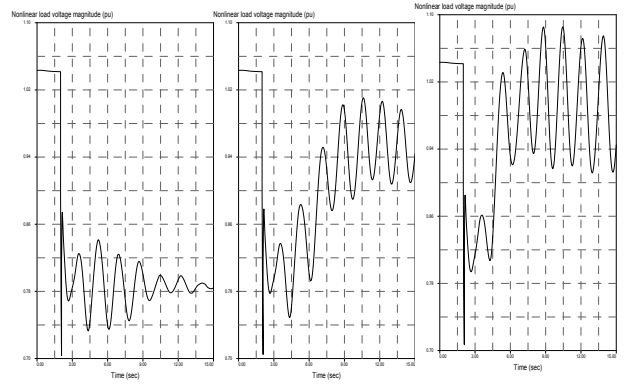
(b) Xs 최소값, 중간값, 최대값 적용



(c) Rr 최소값, 중간값, 최대값 적용



(d) Xr 최소값, 중간값, 최대값 적용



(e) H 최소값, 중간값, 최대값 적용

그림 2 개별 파라미터 적용에 따른 전압 변동

Fig. 2 Voltage variation according to the applied each parameter

그림 2에서 파라미터 변화에 따른 전압 변동 결과를 살펴보면 Rs, Xs, Rr, Xr 파라미터 적용한 경우 전압파형의 변동이 거의 없는 것으로 관찰되었다. 이는 Rs, Xs, Rr, Xr 파라미터가 계통에 대한 영향력이 거의 없다는 것으로 해석 할 수 있다. 반면, H값은 파라미터값이 증가함에 따라 전압파형의 변동이 발생하는 것으로 관찰되었다. H값이 커질수록 전압파형의 진동 폭도 커지게 되지만, 전압회복력은 H값이 낮을 때보다 클 때 계통에 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 개별 파라미터 적용 결과를 통하여 모터부하의 파라미터 중 고정자, 회전자 저항 및 리액턴스 성분의 변화는 무효전력 소비량을 변화시킬 수 있지만 계통 안정화에 영향력을 미치지 않는다고 것을 알 수 있다. 반면 관성 상수의 변화는 계통의 안정성에 직접적으로 연관되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 모터부하 파라미터 중 저항 및 리액턴스는 일반적으로 문헌에서 제시한 값들을 그대로 적용해도 계통안정도에 크게 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 모터부하를 고려한 동특성 해석 시에는 계통 안정성에 직접적인 영향력을 미치는 관성 상수 H 값과 계통 내 존재하는 모터부하의 비율을 다양하게 검토하여 계통의 안정성을 확보할 수 방안에 대한 사례연구가 필요하다.

4. 국내 전력계통 적용 사례연구

본 논문에서는 계통 내에 모터부하의 비율에 따른 계통 변화를 관찰하기 위하여 실제 전력 계통 데이터를 활용하여 사례연구를 진행하였다. 문헌상에서 언급한 모터부하의 비율은 최대 60%~70%까지 구성되며, 각 계통 상황에 따라 40%, 50% 정도로 구성하는 경우도 있다. 따라서 신뢰성 있는 범위는 40%에서 70%까지 고려해 볼 수 있을 것이다. 앞서 관찰한 모터부하의 특성을 반영한 기본 파라미터 값을 적용하였으며, 계통 전체부하에서 모터부하의 비율을 40%~70%로 다양하게 적용하고, 나머지 부하의 유효전력은 고정 전류부하, 무효전력은 고정 임피던스 부하로 고려하였다. 국내 계통의 가장 심각한 고장인 신서산 TL 루트고장에 따른 전압 파형을 관찰하여 전압 지연 회복 현상을 분석하고, 제어방안으로 부하를 차단하는 방안을 적용하여 계통안정화 여부를 검토하였다. 동적 해석을 위해 Powertech사의 TSAT(Transient

Security Assessment Tool) 시뮬레이션 툴을 활용하였다. 그림 3은 동적 시뮬레이션의 수행 절차를 나타낸다.

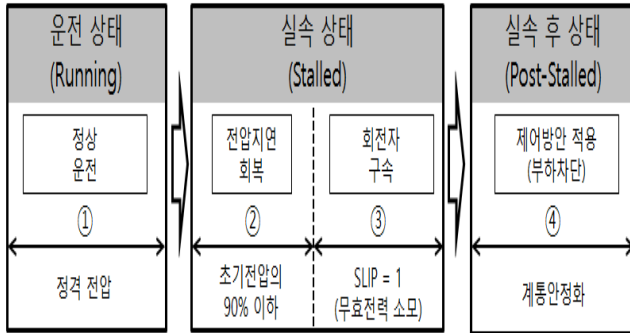


그림 3 동적 시뮬레이션 수행 절차
Fig. 3 Dynamic simulation procedure

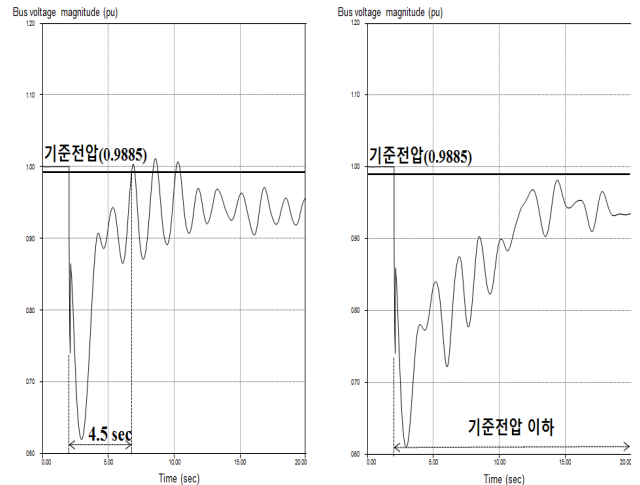
모터부하는 계통 내에서 운전상태, 실속상태, 실속 후 상태로 이루어져 있으며, 이 3가지 상태를 기준으로 전압 지연 회복 현상을 분석하게 된다. 운전상태는 정상적인 전압에서의 운전 상태를 말하고 있으며, 실속상태는 사고가 발생하여 모터부하의 기기적인 특성에 의한 전압 회복을 지연시키는 상태를 말한다. 실속 상태는 기준전압의 90% 이하일 때이므로 말하므로 국내 계통에서는 0.9885[p.u.] 이하일 때 실속 상태라고 할 수 있다. 실속 상태에서는 모터부하의 전류가 구속 상태에 이르기까지 증가하면, 슬립은 1로 향하게 되어 무효전력을 소모하는 상태에 이르게 된다. 실속 후 상태는 모터부하의 실속에 따른 전압 지연 회복 현상을 완화하기 위해 적절한 제어 방안을 적용하는 상태를 의미한다.

그림 4는 모터부하의 비율을 40%, 50%, 60%, 70%로 고려한 경우의 전압파형의 변동을 나타낸다. 전압 지연 회복 현상이 사고 제거 후 사고 전 전압의 90%로 회복되지 않고, 전압 회복이 2초 이상 지연되는 경우를 말하고 있는데 모터부하의 비율을 40~70%로 고려한 모든 경우에 전압이 지연 회복 되는 것을 관찰 할 수 있다.

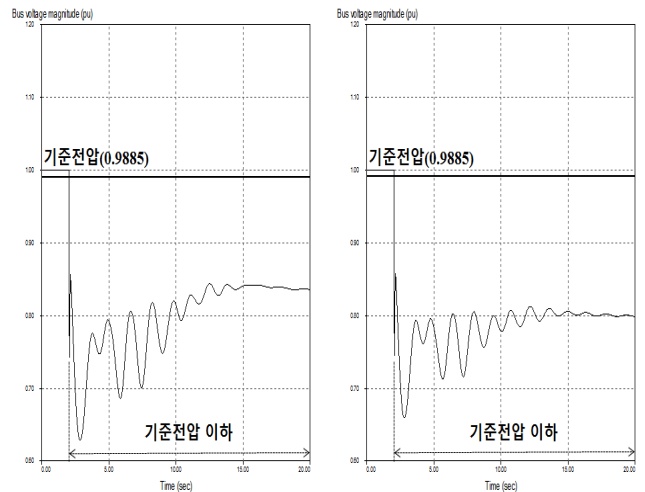
단기 전압불안정은 모터부하의 특성에 의해 발생하게 되며, 계통안정화 여부는 전압파형을 관찰하여 판단하는데 안정화할 경우에는 전압이 빠르게 회복될 것이며, 불안정하다고 판단되는 경우에는 적절한 조치를 취해야 한다. 계통을 안정화시키기 위해서는 신속한 사고 제거, 무효전력보상기기의 투입, 계전기 동작 시간 재설정, 부하차단 방안 등을 활용할 수 있다.

본 논문에서는 전압이 지연 회복 될 경우 계통에서 모터 부하를 분리하여 계통 안정화를 달성할 수 있는 방안인 부하차단 방안을 적용한다. 부하차단 방안을 적용하기 위하여 총 20초의 시뮬레이션을 수행하며 2초에 사고를 발생시키고 0.083초 후에 사고 제거, 0.15초 후에 해당지역 발전기를 탈락시킨다. 대용량 송전선로 사고 시 해당지역 내 부하모선 중에서 민감한 변화를 보이게 되는 모선들을 선정하여 사고 후 0.5초 후에 부하 차단을 수행하였다. 그림 5는 계통의 안정화를 위해 부하차단을 적용한 후의 모터부하의 비율에 따른 계통의 전압 변동을 나타낸다.

부하차단 적용 후 모터부하의 비율에 따른 계통의 전압 지연 회복 현상을 관찰한 결과, 실속 상태 후 계통의 안정화를



(a) 모터부하 비율 40% 적용 (b) 모터부하 비율 50% 적용



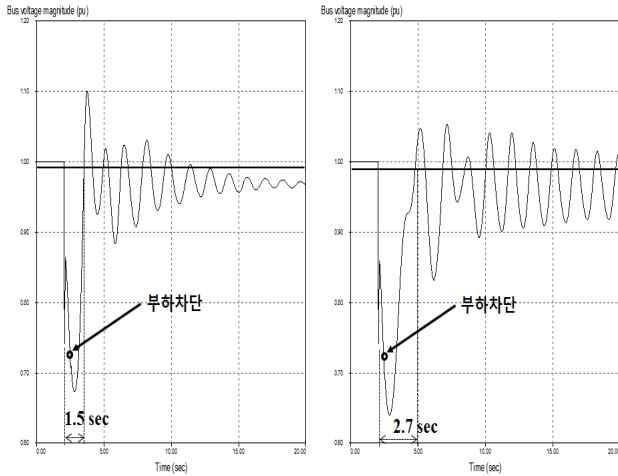
(c) 모터부하 비율 60% 적용 (d) 모터부하 비율 70% 적용

그림 4 모터부하 비율을 다양하게 고려한 경우의 전압 변동
Fig. 4 Voltage variation with considering variety proportion of motor load

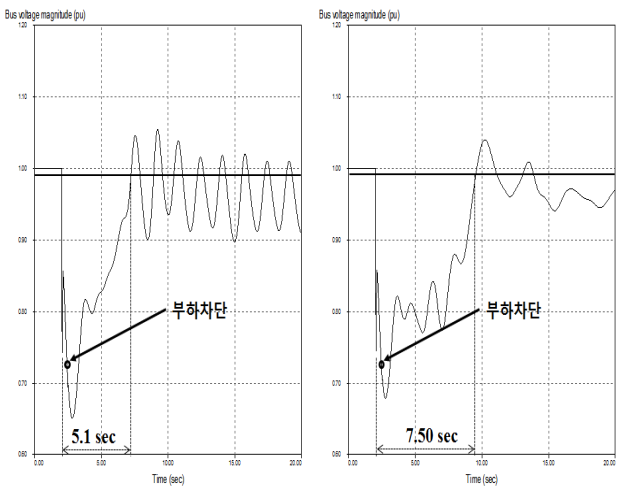
위한 제어 방안을 적용하게 되면 모터부하 비율을 40%로 적용한 경우에 전압 지연 회복 현상이 완화되는 것을 볼 수 있다. 50%, 60%, 70% 경우는 계통이 안정화 되는 전압 파형을 보이나 모터부하에 의한 실속상태가 지속되어 계통의 무효전력을 소모하게 된다는 것을 알 수 있다. 사례연구를 통해 부하차단 방안이 계통안정화를 달성할 수 있는 제어방안임을 확인하였으며, 전압 지연 회복 현상을 감소시키는 효과도 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 모터부하의 특성을 분석하여 전압 지연 회복 현상을 분석하는 방안에 대하여 제안하였다. 계통에 영향을 미치는 모터부하의 파라미터를 분석하였으며, 모터부하의 관성이 전압 회복 특성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한, 계통 내 모터부하가 차지하는 비율을



(a) 부하차단적용(모터부하 40%) (b) 부하차단적용(모터부하 50%)



(c) 부하차단적용(모터부하 60%) (d) 부하차단적용(모터부하 70%)

그림 5 부하차단을 적용한 경우의 전압 변동
Fig. 5 Voltage variation of applied the load shedding

다양하게 적용한 사례연구를 바탕으로 제어방안 적용 후 전압 지연 회복 현상이 완화되는 비율을 관찰하였으며, 도출된 결과는 향후 국내 계통의 모터부하 모델 수립에 중요한 바탕이 될 것이다.

계통에 사고가 발생하면 모터의 운동에너지가 증가하게 되며, 사고 제거 시간이 지연되면 무효전력 소모량이 급증하여 계통에 불안정화에 기인한다. 일반적으로 발전기의 경우, 증가된 운동에너지를 복구할 수 없으면 위상각 안정도를 위하여 발전기를 탈락시키게 된다. 모터부하도 이와 비슷한 현상이 발생하는데 축적된 운동에너지에 의하여 모터가 실속되기 시작하면 인근지역으로 효과가 과급되어 광역정전을 야기할 수 있으므로 고장 발생 시 모터부하가 밀집한 지역의 부하를 빠르게 계통으로부터 분리하여야 광역정전을 방지할 수 있게 된다. 향후에는 계통의 특성을 더욱 정밀하게 반영할 수 있는 모터 파라미터 변화를 고려하고, 더욱 다양한 계통 데이터를 활용한 시뮬레이션을 통해 결과에 대한 검토 및 보완이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 전압 지연 회복 현상을 감소시키기 위한 다양한 제어 방안에 대한 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] Krishnanjan Gubba Ravikumar, Scott Manson, "Analysis of Fault-Induced Delayed Voltage Recovery Using EMTP Simulations", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2016.
- [2] Zhang Yue1,a, Li Xiaoming, "Dynamic Voltage/Var Sensitivity Approach for Improving Fault-induced Voltage Delayed Recovery Problems", International Power, Electronics and Materials Engineering Conference, 2015.
- [3] Richard J. Bravo, Robert Yinger, Patricia AronsS. "Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR) indicators", IEEE PES T&D Conference, 2014.
- [4] NERC Transmission Issues Subcommittee and System Protection and Control Subcommittee, "A Technical Reference Paper Fault-Induced Delayed Voltage Recovery", Version 1.2, June.2009.
- [5] Y. Liu, V. Vittal, J. Undrill, and J. H. Eto, "Transient Model of AirConditioner Compressor Single Phase Induction Motor," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, Issue 4, November 2013,pp. 4528 - 4536.
- [6] Taegyun Kim, Hongjoo Kim, Byongjun Lee, Su-chul Nam, Jeong-hoon Shin, "An analysis of Load Shedding Effect according to the ratio of induction motor in Korean Power System", Kiee Summer confernece, 2011.
- [7] Yun-Hwan Lee, "Using the Under Voltage Load Shedding for Stability Enhancement of Power Systems Considering Induction Motor Load", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65P, No. 1, pp. 1~6, 2016.
- [8] WECC, "Transmission System Planning Performance Proposed Transient Voltage Response Rationale for CRT Requirements ", R 1.3 and R 1.4, 2015.
- [9] U.S. Department of energy, "Commercial Building Motor Protection Response Report", 2015.
- [10] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", 1994.

저 자 소 개



이 윤 환 (李 允 煥)

2010년 고려대 일반대학원 전자전기공학
과 졸업(석사), 2014년 동대학원 졸업(박
사). 2014년~2016년 한국스마트그리드사
업단 신사업추진실 대리, 2016년~쿤텍
(주) 기술연구소 선임연구원

E-mail : yunan2@naver.com