

국내계통에서 모터부하 비율에 따른 부하차단 용량 및 계통 안정화 특성 분석

김태균*, 김홍주*, 이병준*, 남수철**, 신정훈**
고려대*, 한전전력연구원**

An analysis of Load Shedding Effect according to the ratio of induction motor in Korean Power System

Taegyun Kim*, Hongjoo Kim*, Byongjun Lee*, Su-chul Nam**, Jeong-hoon Shin**
Korea University*, KEPRI**

Abstract - 국내 계통은 심각한 고장에 따른 고장급을 방지하기 위하여 부하차단 시스템을 운영하고 있다. 고장급방지시스템을 설계하기 위해서는 차단되어야 할 부하 및 용량, 차단 지연시간을 선정하여야 한다. 차단 부하 및 용량은 정상상태 해석을 통하여 산정할 수 있으며 차단 지연시간은 동적해석을 통하여 적정 시간을 선정하게 된다. 동적해석을 수행하는 과정에서 모터부하의 비율은 매우 중요한 역할을 한다. 모터부하는 kinetic 에너지를 보유하고 있어 모터부하의 비율이 높은 경우 빠르고 적절한 용량의 부하차단이 필요하다. 본 논문에서는 모터부하의 비율에 따른 국내 계통의 특성을 검토하고 계통 안정화를 위한 적정 차단용량에 대하여 분석하였다. 본 논문에서 검토된 결과는 향후 부하차단 단계화를 구현할 때 1단계 적정 차단용량을 선정하기 위한 자료로 활용될 수 있다.

1. 서 론

계통의 심각한 외란에 따른 전압불안정 현상을 방지하기 위한 제어방안 중 가장 쉽고 확실한 제어수단은 부하를 차단하는 방안이다. 하지만 부하차단은 최후의 제어수단으로서 계통을 안정화하기 위한 모든 제어방안이 수행되어도 불안정을 방지할 수 없을 때 수행되어야 한다. 부하차단 시스템은 최소의 부하를 차단하여 계통을 효과적으로 안정화할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 오프라인 해석을 수행하여 가장 심각한 계통상황을 고려한 최적의 부하차단 제어전략을 구축한다. 일반적으로 부하차단 용량 및 차단위치는 정적해석에 기반하여 수행되며 계통의 안정/불안정의 판단을 위한 차단 지연시간은 동적해석에 기반하여 수행된다. 정적해석을 통하여 구현된 부하차단 용량은 계통의 부하가 최대부하일 때를 가정하여 선정되므로 모든 상황에서 1단계에 전량 차단하는 것은 과도한 부하가 차단될 가능성이 있다. 해외에서는 과도한 부하차단을 방지하기 위하여 단계 부하차단 전략을 구축하고 있다. 각 단계별 차단 용량은 단순히 전체 차단 용량을 동일한 비율로 나눌 수도 있으나 이는 매우 위험할 수 있다. 계통의 전압 불안정 현상은 계통 내 모터부하가 차지하는 비율에 따라 크게 영향을 받기 때문이다.

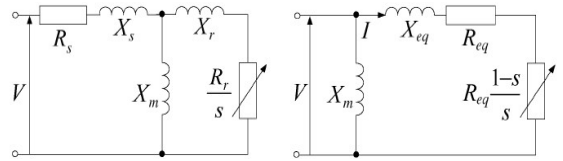
최근 에어컨 부하 등의 급등에 따라 여름철 최대부하 수준에서의 계통은 모터부하 비율이 지속적으로 증가되고 있다. 해외에서는 모터부하의 비율이 증가함에 따라 모터부하가 가지는 kinetic 에너지로 인하여 발생하게 되는 delayed voltage recovery 현상에 대한 논의가 이슈가 되고 있다. 모터부하의 비율이 낮은 경우 사고 후 전압의 회복 시간이 매우 짧게 나타나지만 모터부하의 비율이 높은 경우 전압회복 특성이 지연되며 이는 빠른 광역정전을 야기한다[1]. [2]에서는 이런 현상을 반영하여 전압 회복 특성을 고려한 부하차단 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 국내에서는 전압회복 특성의 지연 현상에 대한 연구 및 모터부하의 특성에 따른 계통영향 평가에 대한 연구가 미비하다. 이에 본 논문에서는 계통내 모터부하가 차지하는 비율에 따른 동적해석 결과의 차이를 분석하고 상황에 맞는 부하차단 용량이 어떻게 달라지는지를 분석한다. 전압수준 유지 및 불확실성을 고려한 2, 3단계 차단이 필요할 수도 있으나 본 논문에서는 초기 전압안정화에만 관심을 가지도록 한다. 본론에서는 모터부하의 정적 특성에 대하여 분석하고 이를 바탕으로 모터부하의 슬립 및 전압수준에 따른 유/무효전력 소비 특성에 대하여 관찰한다. 모터의 부하특성에 따라 일정 전압수준 이하로 계통전압이 감소하게 되면 계통은 심각한 광역정전을 경험할 수 있다. 이를 바탕으로 한전계통에서의 모터부하 비율에 따른 안정성을 평가하고 계통 안정화를 위한 부하차단의 효과를 검토한다.

2. 본 론

2.1 모터부하의 정상상태 모델링

유도전동기 부하는 모선의 전압값에 따라 소비되는 유/무효전력 부하량이 달라진다. 이를 모델링하기 위해서는 기본적으로 모터부하의 특성을

이해하여야 한다. 다음 그림은 모터부하의 가장 기본적인 형태를 보인다.



<그림 1> 정상상태 모터 모델링

위 그림에서 R_s 및 X_s 는 stator 저항 및 리액턴스이고, R_r 및 X_r 는 rotor 저항 및 리액턴스이며, X_m 은 magnetizing 리액턴스이다. s 는 $(w_s - w)/w_s$ 로 표현되는 모터의 slip을 나타낸다. 일반적인 경우 R_s 는 매우 작은 값을 가지며 $X_m \gg X_s$ 이다. 따라서 $X_{eq} = X_s + X_r$, $R_{eq} = R_r$ 라 하면, 등가화된 모터모델은 위 그림의 오른쪽과 같이 표현된다.

2.2 모터부하의 부하특성

위 그림의 간략화된 모델을 적용하면, 부하에 흐르는 전류 I 는 다음과 같이 표현된다.

$$I^2 = \frac{V^2}{X_{eq}^2 + (R_{eq}/s)^2} \tag{1}$$

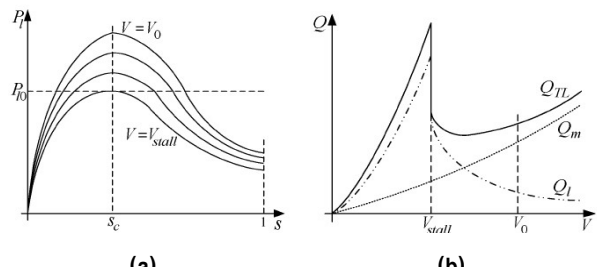
소비되는 유/무효전력 부하는 다음과 같다.

$$P_l = I^2 \frac{R_{eq}}{s} = V^2 \frac{R_{eq}s}{R_{eq}^2 + (X_{eq}s)^2}, \quad s_c = \frac{R_{eq}}{X_{eq}} \tag{2}$$

$$Q_l = I^2 X_{eq} = V^2 \frac{X_{eq}s^2}{R_{eq}^2 + (X_{eq}s)^2} \tag{3}$$

$$Q_m = \frac{V^2}{X_m}, \quad Q_{TL} = Q_m + Q_l \tag{3}$$

위 관계식으로부터 모터부하에서 소비되는 부하량은 전압 및 slip에 의존적임을 알 수 있다. 수식으로 표현된 소비부하를 그래프로 나타내면 다음 그림과 같다.



<그림 2> 모터부하의 P-s and Q-V 특성

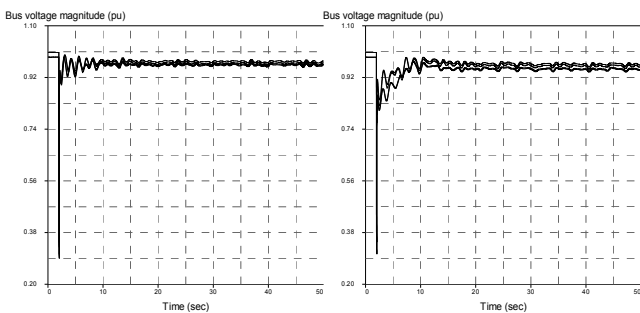
위 그림의 (a)는 P-s 특성그래프를 보인다. s_c 를 기준으로 왼쪽에 해당하는 부분이 안정한 운전영역을 나타낸다. 만약 계통이 안정한 운전영역($s < s_c$)에 있을 때 소비되는 무효전력 부하는 위 그림의 (b)와 같이 나타난다. 이때 소비되는 무효전력 부하는 전압의 함수로 표현된다. 만약 전압이 점차적으로 감소하면 소비되는 Q_l 은 점차적으로 증가하다가 $V = V_{stall}$ 인 점에서 기하급수적으로 증가한다. 반대로 Q_m 은 전압이 감

소하면 소비전력 역시 감소한다. 이 두 그래프를 합한 Q_{TL} 은 다음과 같은 특성을 보인다.

- i) 전압이 rated voltage에 가까우면 constant power 특성을 보인다.
 - ii) 전압이 V-stalling에 가까우면 Q 부하는 기하급수적으로 증가한다.
- 이과 같은 모터부하의 부하특성은 심각한 고장이 발생하였을 때 전압 회복을 지연시키는 delayed recovery voltage 현상을 야기시키고 이는 더 많은 무효전력 부하를 소비하게 만들어 계통의 광역정전을 야기할 수 있다. 따라서 계통내 존재하는 모터부하의 비율에 따라서 사고 후의 계통 전압 파형은 상황에 따라 다르게 나타날 수 있으며 계통안정화를 위한 부하차단 용량 역시 이를 반영한 용량이 산정되어야 한다.

2.3 국내계통 적용 사례

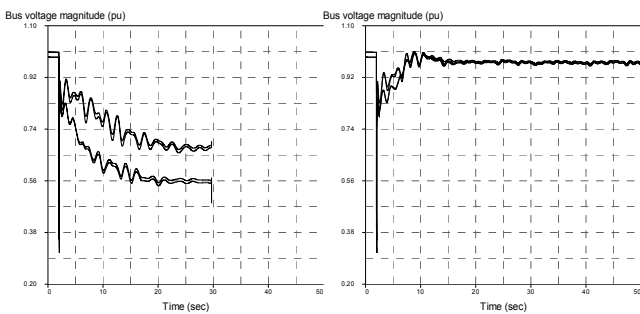
본 절에서는 앞서 언급된 모터부하 특성을 반영하여 국내 계통의 심각한 고장에 따른 계통 전압파형을 살펴본다. 사고는 신서산TL 루트고장을 적용하였으며 계통 모의를 위하여 TSAT 동적 시모의를 수행하였다. 국내 계통의 모터부하에 대한 파라미터 선정이 적절하게 되어 있지 않으므로 본 논문에서는 제공되는 모델의 기본 파라미터를 그대로 적용하였으며 전체 부하량 대비 모터부하가 차지하는 부하량을 달리하여 그 비율에 따라 전압파형 및 부하차단 특성에 대하여 검토하였다. 다음 그림은 모터부하가 있는 경우와 없는 경우의 전압파형을 비교한 결과를 보인다.



(a) ZIP모델 적용 (b) 모터부하 50% 적용
 <그림 3> 모터부하 유/무에 따른 전압 회복 특성

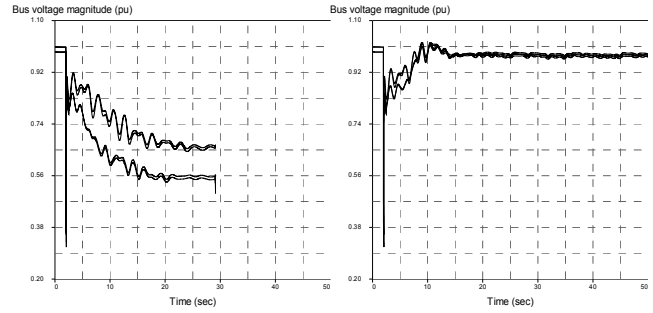
위 그림에서와 같이 ZIP모델만으로 계통을 검토하는 경우 사고 후 전압회복이 빠른 특성을 보이지만 모터부하를 적용할 경우 전압 회복 특성이 지연되는 현상을 관찰할 수 있다.

현행 부하차단 시스템은 신서산TL 고장시 최대 약 1500MW의 부하를 차단하도록 설계되어 있다. 만약 부하차단 단단계를 구현할 경우 총 용량대비 일정 수준의 부하를 1단계에서 차단하고 이후 2, 3단계 차단용량이 결정될 것이다. 다음 그림은 모터부하의 비율을 60%로 늘리는 경우의 전압파형과 1단계 부하차단을 총 차단용량의 40%로 수행한 결과를 보인다.



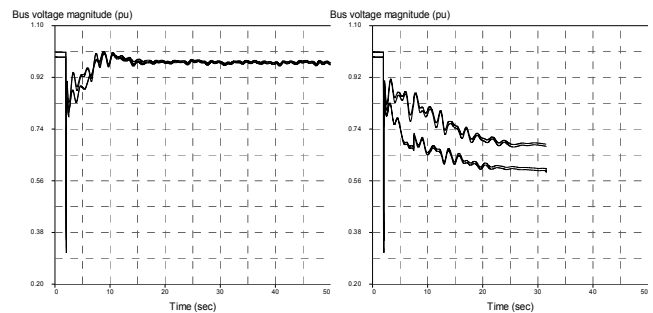
(a) 부하차단 없음 (b) 총 차단부하의 40% 차단
 <그림 4> 모터부하 60%일 때의 부하차단 효과

모터부하가 총 부하의 60%인 경우 사고 후 계통 불안정을 경험한다. 이때 현행 총 차단용량의 40%를 사고 후 0.5초에 차단하는 경우 계통을 안정화 할 수 있다. 다음은 계통내 존재하는 모터부하의 비율이 65%인 경우를 보인다. 이때 계통 불안정을 방지하기 위하여 현행 총 차단용량의 40%를 차단하는 경우와 60%를 차단하는 경우를 비교하였다. 아래 그림에서와 같이 계통내 존재하는 모터부하의 비율이 65%인 경우 현행 총 차단용량의 40%를 차단하는 경우 계통의 안정화에 실패하는 결과를 보였다. 이는 모터부하가 60%인 경우 40%부하차단으로 안정화를 달성했던 경우와 대조적이다. 이때는 총 차단부하의 60%를 차단하는 경우 계통 안정화를 달성할 수 있었다.



(a) 총 차단부하의 40% 차단 (b) 총 차단부하의 60% 차단
 <그림 5> 모터부하 65%일 때의 부하차단 효과

현행 국내 UVLS 시스템은 전용통신선의 부재로 인하여 실제 부하차단까지는 차단 지연시간이 존재한다. 다음은 모터부하 비율이 60%인 경우 차단 지연시간 없이 총 차단부하의 40%를 차단하는 경우와 지연시간 5초를 적용하여 총 차단 부하 100%를 차단하는 경우를 비교하였다.



(a) 통신지연 없이 40% 차단 (b) 통신지연 후 100% 차단
 <그림 6> 모터부하 60%일 때 통신지연에 따른 부하차단 효과

계통이 불안정해지는 경우 부하차단의 통신지연이 없는 경우에는 총 차단 부하의 40%만을 차단하여도 계통안정화를 달성할 수 있었다. 하지만 통신지연에 따라 차단이 지연되는 경우 총 차단부하 100%를 차단하여도 계통 안정화에 실패하였다. 이는 이미 전압수준이 V-stall 값까지 내려가면서 모터부하의 무효전력 소비가 기하급수적으로 증가했기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 모터부하의 비율에 따른 계통변화를 관찰하고 비율에 따라 1단계 차단되어야 하는 부하차단 용량이 달라질 수 있음을 관찰하였다. 또한 현행 시스템과 같이 통신지연이 존재하는 경우 부하차단이 이루어져도 계통 안정화에 실패할 수 있음을 보였다. 본 연구결과는 향후 지능형 부하제어 시스템의 설계에 있어 실시간 계통안정화를 위한 최적의 부하차단 용량을 산정하는데 있어 중요한 바탕이 될 것이다.

<감사의 글>

본 결과물은 한국 에너지기술평가원(한전전력연구원)의 연구지원 및 한국과학재단의 연구지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] Hua Bai, and V. Ajjarapu, "A Novel Online Load Shedding Strategy for Mitigating Fault Induced Delayed Voltage Recovery", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.26, No.1, p.294~303, 2011
 [2] S.M.Halpin, K.A.Harley, R.A.Jones, and L.Y.Taylor, "Slope permissive under voltage load shed relay for delayed voltage recovery mitigation", IEEE Trans. Power System, Vol. 23, No.3, p.1205~1210, 2008
 [3] [1] M.Klaric, I.Kuzle and Tomisa, 'Simulation of Undervoltage Load shedding to Prevent Voltage Collapse', Power Tech, 2005 IEEE Russia, 27~30 June 2005 Page 1~6