

순간전압강하 극복을 위한 대용량 유도전동기 제어방식 설계 및 해석

조 성 돈 임 성 호
한국전력기술(주)

Design and Analysis of Large Induction Motor Control Coping with Voltage Sag

Sung Don Cho Seong Ho Lim
Korea Power Engineering Company

Abstract - Voltage dips caused by transmission system faults are usually of a short duration. High speed relaying and breaker operation will typically limit the disturbance to 0.1 seconds. Most motor controllers obtain their control power directly from the bus by means of a control transformer. Under this condition, a voltage dip can cause the contactor to drop out, disconnecting the motor from the line. The rapid re-energizing of the controller is in effect a fast reclosure which may result in motor damage. The time delay re-energizing of controller will result in a greater loss of speed and possibly loss of stability. Other means of controller can be used to prevent the motor from being disconnected from line during the fault. This can be accomplished by DC power controller or mechanically latched controller. This paper demonstrates that DC power controller or mechanically latched type controller to prevent the motor from being disconnected from line during the fault is the most effective in minimizing speed reduction, transient motor current, transient motor torque and transient shaft torque by EMTP calculation.

1. 서 론

산업플랜트의 수전계통 또는 자체 전기계통에서 일선 지락, 선간단락, 삼상단락 등 전기적 사고시 산업플랜트 전기계통에는 순간전압강하가 발생하여 전동기의 회전속도가 감소하거나 교류제어전원의 상실로 전동기가 정지할 수 있다. 이로인해 산업플랜트의 정지를 초래할 수 있으므로 중요한 부하의 경우 순간전압강하에 대한 적절한 대책이 마련되어야 한다. 순간전압강하의 지속시간은 보호계전기와 차단기의 동작시간등을 포함하여 대략 수 사이클에서 수십 사이클정도이나 전동기 개폐기의 제어 전원을 교류를 사용하는 경우 개폐기가 개방되어 전동기가 정지하게 된다. 이를 막기위해 중요한 부하의 전동기는 짧은 시간내에 전압이 회복될 경우 즉각적으로 개폐기를 재투입하는 제어방식을 사용하고 있으나 전동기 재투입(Reclosing)시 발생하는 과도현상(과도돌입전류, 과도속도오크)에 의해 전동기가 손상을 받을 수 있다. 따라서 순간전압강하시 전동기 개방회로시정수(T'do)시간 이상 경과후 전동기를 재기동하는 방식을 사용하기도 하나 전동기의 속도가 크게 저하될 뿐만 아니라 다수의 전동기를 동시에 재기동하므로써 기동전류에 의해 저전압 현상이 지속되는 등의 계통에 악영향을 주며 심지어 전동기 보호계전기의 동작으로 재기동에 실패하기도 한다. 이에 대한 대안으로 제어전원을 계통사고에 영향을 받지 않는 직류전원을 사용하거나 기계식 랫치방식의 개폐

기를 사용하여 순간전압강하시 개폐기의 투입상태를 유지 하는 경우 전동기 속도저하와 과도 충격을 최소화 할 수도 있다. [1,2,3]

따라서 본고에서는 순간전압강하에 대비한 상기 전동기 제어방식들에 대해 전동기의 속도저하와 전동기에 미치는 전기적, 기계적 충격들을 EMTP를 이용하여 모의분석하고 이를 토대로 적절한 제어방식을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 순간전압강하의 원인

154kV를 수전하는 산업플랜트의 경우 그림1과 같이 플랜트 배전계통을 위해 22.9kV로 일차 변압하고 다시 대용량 고압전동기등의 부하를 위해 6.6kV로 이차변압하는 수지(Tree)상 전기계통구성방식이 대부분이다. 계통접지는 154kV계통은 직접접지를 22.9kV계통과 6.6kV계통은 저저항접지를 주로 사용하고 있다.

이러한 전기계통에서 순간전압강하의 원인 중 대부분을 차지하는 전기계통의 일선지락, 선간단락, 삼상단락 등의 전기적 사고는 피할 수 없다. 단지 보호계전기, 차단기등의 기술의 발달로 그 지속시간이 짧아지고 있는 추세에 있다. 전기적 사고 중 거의 대부분은 일선지락사고이며 다음으로 선간단락이 일부분을 차지하고 있다. 삼상단락사고는 극히 드문 경우이다. 일선지락사고시 완전지락이 발생하더라도 변압기의 결선에 따라 각 모선의 전압은 표1과 같이 다양하게 나타날 수 있다. 교류제어 전원을 위해 6.6kV 모선의 C-A상의 선간전압에 제어용단상변압기를 사용한 경우 개폐기의 개방전압(Drop-out Voltage)이 약 60%이므로 지락시 개폐기는 개방된다.

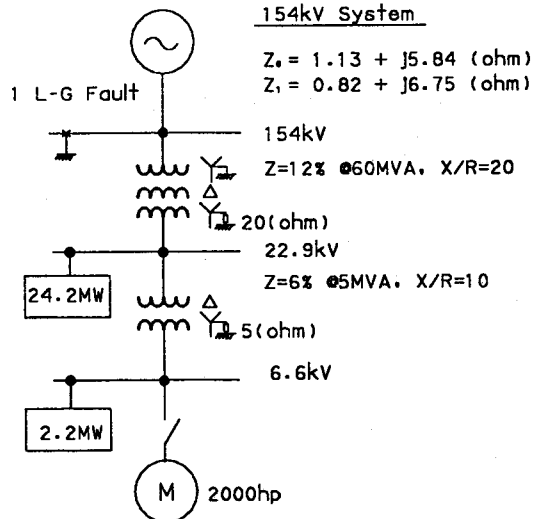


그림 1. 154kV 수전 플랜트 전기계통 단선도

표1. 154kV A상 지락사고시 각 모선 전압(%)

모선명	A-B	B-C	C-A	A	B	C
154kV	58	100	58	0	100	100
22.9kV	58	100	58	28	88	88
6.6kV	88	88	28	58	100	58

2.2 전동기부하의 특성

관심대상인 6.6kV 계통의 전동기부하를 제외한 기타 부하는 계산의 편의상 일정임피던스부하로 모의하였다. 전동기는 전동기 쇄교자속의 변화가 고려되어 개폐기가 개방된 시간동안 전동기 잔류전압과 개폐기 재투입시 과도전류가 정확히 계산되는 전동기 상세모델(EMTP의 Type19)을 그리고 전동기와 전동기부하의 축 토오크(Shaft Torque, Ts)를 계산하기 위하여 다음 식1,2,3이 각각 사용되었으며 EMTP내에서는 Tm, Tl은 전류로, Jm, Jl은 커패시턴스로, Dm, Dl은 저항의 역수로, Ks는 인덕턴스의 역수로, ωm, ωl은 전압으로 각각 변환되어 계산된다. [4]

$$d\omega_m/dt = d^2\delta_m/dt^2 = (T_m - T_s - D_m\omega_m) / J_m \dots \text{식1}$$

$$d\omega_l/dt = d^2\delta_l/dt^2 = (-T_l - T_s - D_l\omega_l) / J_l \dots \text{식2}$$

$$T_s = K_s(\delta_m - \delta_l) \dots \text{식3}$$

Tm, Tl : Motor and Load Torque (N.m)
 Jm, Jl : Moment of Inertia (Kg.m²)
 Dm, Dl : Damping Coefficient (N.m.sec/rad).
 ωm, ωl : angular velocity (radian/sec)
 ωo : Synchronous angular velocity (radian/sec)
 Ts : Shaft Torque (N.m)
 Ks : Stiffness of Shaft (N.m/radian)
 δm, δl : Angle of Rotation (radian)

2.3 상정사고시 전동기 개폐기의 동작

전기적 사고 중 거의 대부분은 일선지락사고이므로 본 고에서는 154kV 모선에서 0.1초 동안의 1선(A상) 지락사고를 상정사고로 모의하였다. 전동기 개폐기의 조작전원을 교류를 사용하는 경우 모선의 선간전압에 제어용 단상변압기를 취부하여 그 제어전원을 얻고 있다. 따라서 표1과 같이 일선지락사고가 어느 상에서 발생하느냐에 따라 제어전압이 상실될수도 있고 제어전압이 유지될수도 있다. 여기서는 일선지락사고가 발생한 상에서 제어전원을 얻고 있는 것으로 즉 직접적인 영향을 받는 것으로 가정하였다. 개폐기의 개방전압은 정격전압의 60%로 개방시간은 0.05초, 전압회복후 투입시간은 0.1초로 각각 가정하였다. 차단기 개폐기 제어방식별 개폐기 동작 시나리오는 다음과 같다.

- **A방식** : 직류전원을 사용하거나 기계식 램치방식의 개폐기를 사용하는 경우
 0.1초(사고발생)-0.2초(사고제거)
- **B방식** : 전압이 회복될 경우 즉각적으로 개폐기를 재투입하는 제어방식을 사용하는 경우
 0.1초(사고발생)-0.15초(개폐기 개방)-0.2초(사고제거)-0.3초(개폐기 투입)
- **C방식** : 순간전압강하시 전동기 개방회로시정수인(T'do) 0.5초 경과후 전동기를 재기동

하는 경우

0.1초(사고발생)-0.15초(개폐기 개방)-0.2초(사고제거)-0.7초(개폐기 투입)

2.4 EMTP를 이용한 모의분석

상기 제어방식들에 대해 6.6kV 유도전동기를 대상으로 전동기의 속도저하와 전동기에 미치는 전기적, 기계적 충격에 대해 EMTP로 모의분석한 내용은 다음과 같다.

2.4.1 전동기 전압 추이

그림2와 같이 A방식-B방식-C방식 순으로 사고제거후 전압이 회복되고 있다. 일선지락 사고시간동안 A상 전압은 약 58%정도 유지되고 있으며 B방식의 경우 전동기 개방회로시정수에 따라 0.1초후 경과후 전동기 내부 유기기전력이 약 65%를 유지하고 있으나 C방식의 경우는 전동기 개방회로시정수와 속도저하에 따라 0.5초 경과후 약 20%의 전압으로 감소하고 있다. 따라서 C방식의 경우 B방식에 비해 과도돌입전류는 작으나 개폐기 투입후 전동기 속도저하로 인한 전동기 재기동전류때문에 약 80% 정도의 낮은 전압이 재기동시간 동안 지속되고 있음을 알 수 있다.

2.4.2 전동기 속도 추이

그림3과 같이 A방식-B방식-C방식 순으로 속도가 회복되고 있다. A방식의 경우 일선지락 사고시간동안 최소 58%정도의 전압이 유지되고 있었기 때문에 속도저하가 극히 작으며, C방식의 경우 0.5초 동안 개폐기 개방로 전원이 완전히 차단되었기 때문에 약 60%수준으로 저하되고 있음을 알 수 있다. 60%수준으로의 속도저하는 속도가 중요한 역할을 하는 프로세스에 문제를 야기 시킬 수 있다.

2.4.3 전동기 전류 추이

그림4와 같이 B방식-C방식-A방식 순으로 과도전류가 크게 나타나고 있다. B방식의 경우 약 16배의 과도 돌입전류가 흐르는 이유는 개폐기가 재투입할 때 전동기 내부유기기전력이 약 65%를 유지하고 있었으며 내부유기기전력의 상차각이 공급전압의 위상각과 상당히 벌어져 있었기 때문이다. 이러한 현상은 발전기의 비동기투입과 유사한 현상이므로 상차각을 줄이기 위하여 모선절환(Bus Transfer)과 같이 개폐기의 개방 후 재투입하는 시간차를 아주 짧게 하던지 아니면 아예 C방식과 같이 전동기개방회로 시정수 이상으로 지연시켜 전동기 내부유기기전력을 30%이하로 감소시킨후 개폐기를 투입하여야만 과도돌입전류를 피할 수 있다. 단 C방식의 경우 속도저하에 따른 전동기 재기동전류가 재기동시간 동안 흐르고 있으므로 다수의 전동기를 재기동하는 경우 모선의 인입차단기 보호계전기가 동작하지 않도록 설계되어야 한다.

2.4.4 전동기 토오크 추이

그림5와 같이 B방식-C방식-A방식 순으로 과도토오크가 크게 나타나고 있다. B방식의 경우 앞의 과도돌입전류에 의해 정격토오크의 약 16배의 과도토오크가 발생하고 있다. 이러한 과도토오크는 전동기의 권선과 절연등에 과다한 기계적인 힘을 가해 손상을 입힐 수 있다.

2.4.5 전동기 축 토오크 추이

그림6과 같이 B방식-C방식-A방식 순으로 과도 축 토오크가 크게 나타나고 있다. B방식의 경우 과도 돌입전류와 과도 전동기토오크에 의해 과도 축 토오크 역시 크게 발생하고 있다. 이러한 과도 축 토오크는 전동기 축에 순간적인 힘을 가하게 되며 누적될 경우 급속파괴현상에 의해 축이 절단되는 사고로 진행될 수 있다.

2.5 분석 결과

모의분석한 결과 전동기의 속도저하면에서는 A방식-B방식-C방식 순으로, 전동기에 미치는 전기적, 기계적 충격면에서는 A방식-C방식-B방식 순으로 우수한 것으로 나타났다. 직입기동 전동기는 약 10~13배(비대칭실효 전류 기준)에 해당하는 직입기동전류 또는 단자에서의 3상단락사고전류에 대한 과도 전류와 과도 토오크, 과도 축도오크를 견디도록 설계되어 있으므로 B방식에서 발생하는 과도한 전류, 토오크등은 전동기 설계한계를 초과하는 수준이므로 전동기에 손상을 줄 수 있다. 더욱이 지락사고등은 전동기 수명기간중에 수차례 반복될 수 있으므로 상기와 같은 손상은 누적되어 치명적인 손상을 입힐 수 있다.

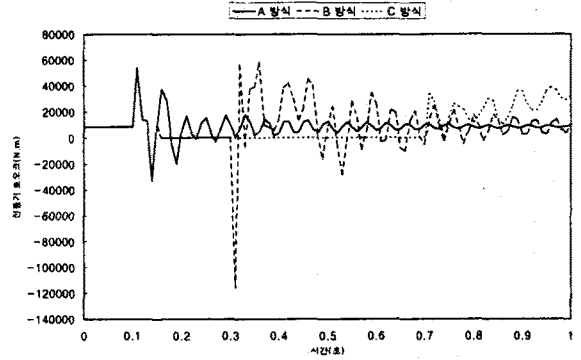


그림5. 전동기 토오크 추이

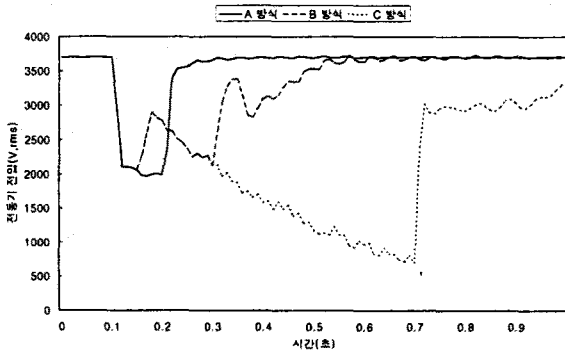


그림 2. 전동기 A상 전압(실효치) 추이

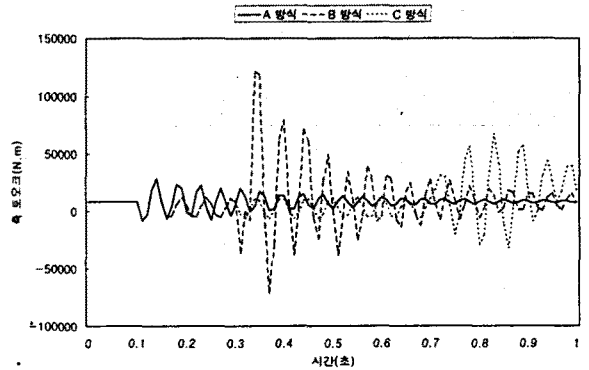


그림6. 전동기 축 토오크 추이

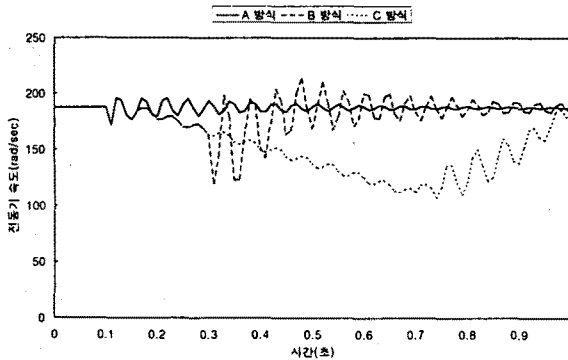


그림3. 전동기 속도 추이

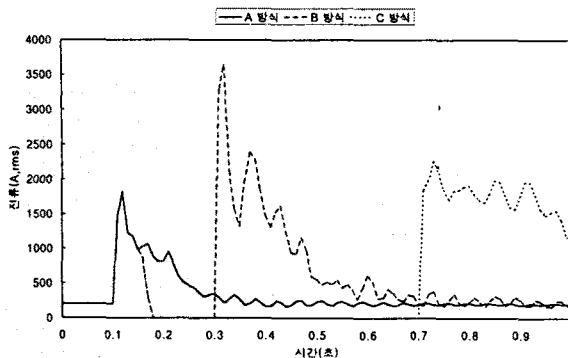


그림4. 전동기 A상 전류(실효치) 추이

3. 결 론

154kV로 수전하는 전기계통에서 6.6kV 전동기를 대상으로 각 제어방식들에 대해 154kV 모선에서의 지락사고시 전동기의 속도저하와 전동기에 미치는 전기적, 기계적 충격에 대해 EMTP로 모의분석한 결과 순간전압강하 후 즉각적으로 개폐기를 재투입하는 제어방식 또는 일정시간 경과후 개폐기를 재투입하는 제어방식 보다 직류전원을 사용하거나 기계식 램치방식의 개폐기를 사용하여 개폐기를 개방하지 않는 방식이 전동기의 속도저하와 전동기에 미치는 과도 충격을 최소화 할 수 있는 것으로 검토되었다. 따라서 전동기의 속도저하 또는 정지가 플랜트에 미치는 영향이 큰 중요 전동기의 제어방식으로는 직류전원을 사용하거나 기계식 램치방식의 개폐기를 사용하여 순간전압강하시 개폐기를 개방하지 않는 방식이 가장 적절한 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.L. Beanel, "Maintaining process continuity during voltage dips", IEEE PCI 81-15, 1981
- [2] J.C. Das, "Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors", IEEE Trans. on IA, vol.26 no.4 July/Aug., 711~718, 1990
- [3] K.W. Carick, "Minimizing the Effects of Voltage Disturbances on Continuous Industrial Process", IEEE Trans. on IA, vol.32 no.6 Nov./Dec., 1424~1430, 1996
- [4] 조성근, "대용량 유도전동기 모델 및 응용", 제9차 EMTP Workshop, 13-33, 1994