장거리 배전선로에서 펌프구동용 대용량 전동기의 기동특성 분석 연구

이남형*, 이광호*, 김현일*, 장정호*
한국수자원공사 수자원연구원 설비에너지연구소*

Starting Performance Analysis for Large Induction Motor Pump System Under the Circumstance of Long Distance Distribution Line

Nam-Hyung Lee*, Kwang-Ho Lee*, Hyun-Il Kim*, Jung-Ho Jang*
Korea Institute of Water and Environment(KIWE)*

Abstract - 장거리 배전선로를 이용하여 대용량의 모터펌프를 기동할 경우 상대적으로 큰 임피던스 전압강하에 따른 모터의 기동불능 및 기동지연 등의 현상이 발생할 가능성이 있다. 본 논문에서는 K-water D 취수장에서 운영중인 2200kW 모터 기동시 발생하는 이상 현상에 대한 원인을 분석하고 이에 대한 해결책을 제시하였다. 특히 장거리 배전선로 환경하에서의 모터 기동시 문제점에 대한 해결책을 제시하기 위해 PTW를 이용하여 시뮬레이션하였다.

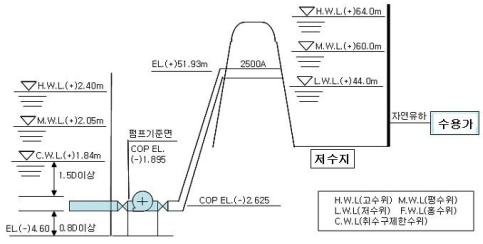
1. 서 론

대용량 모터를 운전하기 위해서는 전압강하를 고려하여 154kV로 수전 받는 것이 기술적으로 가장 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 철탑 경과지 선정의 어려움 또는 건설비용 과다 등의 이유로 22.9kV 배전선로를 이용할 수 밖에 없는 경우, 특히 배전선로의 길이가 장거리인 경우 과도한 임피던스 전압강하로 인한 기동불능 이나 기동지연 등의 문제가 발생 할 수 있다. 또한 기동 완료 후 정상적인 운전중에도 전압강하로 인한 운전전류의 증가는 추가적인 전력요금의 부담을 초래하여 경제적으로도 바람직하지 않을 뿐만 아니라 모터의 과열운전에 따른 수명단축을 촉진할 수 있는 요인이 될 수 있다. 본 고에서는 K-water의 D 취수장에서 발생한 모터 기동불능 현상에 대한 분석을 위하여 Power Tools for Windows(PTW)를 이용하여 이에 대한 해결책을 모색하였다.

2. 본 론

2.1 모터펌프 운영 환경

K-water D취수장은 KEPCO 154kV S/S로부터 27.5Km 22.9kV 전용선로로 수전하여 7,500kVA/6.6kV 유입식변압기를 통하여 모터에 전원을 공급한다.



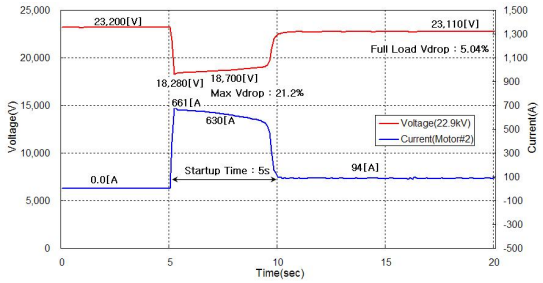
<그림 1> 취수장-저수지 개략도

<표 1> 모터 및 펌프 제원

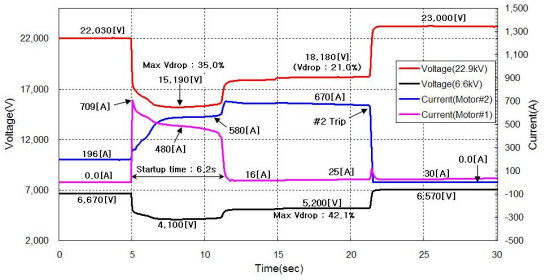
Motor	Pump
수평형 3상 유도전동기(8극)	양흡입볼류트 원심펌프
정격전압/전류 : 6600V/232.6A	양정 : 53.8m
정격용량/회전수 : 2200kW/892rpm	토출량 : 127.4㎥/분
motor imp r_1=0.14963Ω, x_1=2.2661Ω, r_2=0.13314Ω, x_2=2.41578Ω	

2.2 현상

모터 1대를 토출밸브 전폐하여 80%리액터 기동할 경우(그림2) D취수장 22.9kV 수전단 전압은 20~21.5%까지 전압강하가 발생하였고(약 5초 지속), 모터 1대를 토출밸브 전개하여 운전중 추가로 1대를 기동할 경우(그림3) 22.9kV 수전단의 전압강하가 최대 35% 발생하였으며, 이 경우 기 운전 중이던 모터의 Locked Rotor/Stall Current Protection Relay(51LR)가 동작하여 비상정지(trip) 하는 특성을 보이고 있다.



<그림 2> 모터 1대 기동시



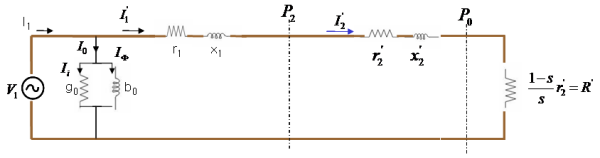
<그림 3> 모터 추가 기동시

2.3 원인분석

일반적으로 정상동작중인 모터가 다른 모터의 추가 기동시 일시적인 전압강하로 인한 전류 증가 현상이 발생할 수 있으나 본 건의 경우처럼 지속되는 경우는 극히 이례적인 것으로서 이에 대한 원인을 분석하였다.

2.3.1 모터의 속도-전류, 속도-토오크 특성 곡선

정상동작중인 모터가 다른 모터의 추가 기동에 의한 전압강하로 인한 과도한 과전류가 흐르는 원인을 찾기 위하여 모터의 속도-전류-토오크 특성 곡선을 분석하였다.



<그림 4> 모터 등가회로

<그림4> 모터 등가회로로부터 2차입력 P_2는

$$P_2 = E_2 I_2 \cos\theta$$

$$P_2 = E_2 \times \frac{E_2}{\sqrt{(\frac{r_2}{s})^2 + x_2^2}} \times \frac{\frac{r_2}{s}}{\sqrt{(\frac{r_2}{s})^2 + x_2^2}} = \frac{E_2^2}{(\frac{r_2}{s})^2 + x_2^2} \times \frac{r_2}{s}$$

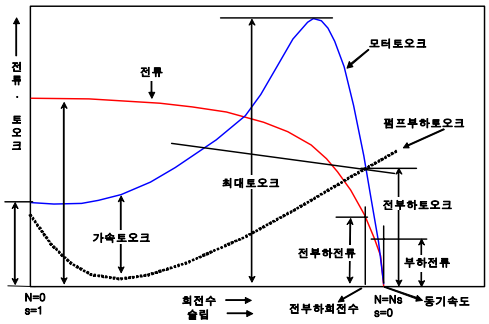
이므로 $P_2 \propto \tau \propto E_2^2$ 의 관계가 성립한다. 또한

$$P_0 = \omega\tau = \frac{2\pi N_{rpm}}{60}\tau[W]$$ 라고 놓으면, 토오크는

$$\tau = \frac{60}{2\pi N_{rpm}} P_0 = 9.55\frac{P_0}{N} = 9.55\frac{(1-s)P_2}{(1-s)N_s} = 9.55\frac{P_2}{N_s}[N.m]$$

$$\tau = \frac{P}{4\pi f} \times \frac{V_1^2 \frac{r_2'}{s}}{(r_1+\frac{r_2'}{s})^2+(x_1+x_2')^2} \propto \frac{V_1^2}{f}$$

의 관계가 성립하므로 모터의 임피던스는 일정하므로 토오크는 슬립과 전압의 함수임을 알 수 있다. 이 식을 이용하여 <그림5>와 같은 속도-전류-토오크 특성곡선을 얻을 수 있다.



〈그림 5〉 모터 속도-전류 토오크 곡선

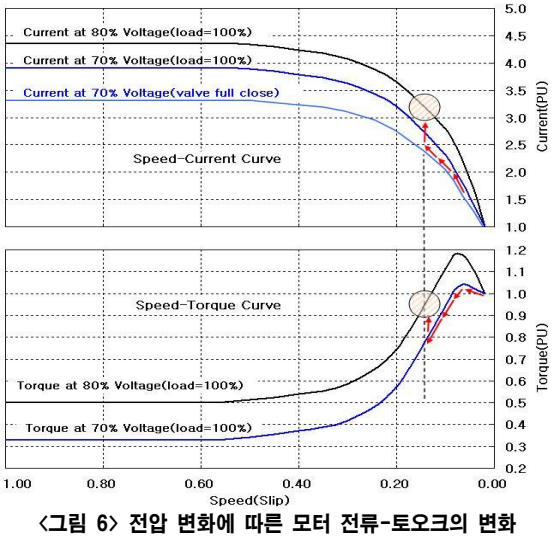
2.3.2 모터의 과도현상 분석

모터 1대 정상운전(운전전류 196A)시의 전압강하 약 5% 상태에서 모터 추가 기동직후(t_2)의 전압강하는 최대 약 32%로 관측되었으며 이후 2.5초 정도 전압강하가 지속되어 최대전압강하는 42%에 달하였다.

〈표 2〉 모터추가 기동시의 시간대별 전압 및 전류

구 분	시간	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
22.9kV Bus	전압[V]	22,030	17,000	15,200	18,180	23,200
	비율[%]	5.0	26.7	34.5	21.6	0.0
모터 #2	전류[A]	196	280	580	670	0
	비율[%]	84.3	120.4	249.4	288.0	0.0
모터 #1	전류[A]	0	708	490	25	30
	비율[%]	0.0	0.4	206.4	10.7	12.9
6.6kV Bus	전압[V]	6,670	4,800	4,100	5,200	7,030
	비율[%]	5.1	31.7	41.7	26.0	0.0

따라서 <그림6> 모터의 속도-전류, 속도-토오크 곡선에서 보였듯이 1대의 모터가 95% 전압으로 운전중(t_1) 추가로 1대를 기동하여 전압이 70%까지 하락(t_2)하면 기 운전중인 모터의 가속토오크가 감소하고 이에 따라 모터의 슬립이 증가하게 된다. 모터의 슬립의 증가는 결국 전류의 증가로 이어지고 이는 전압강하를 더욱 크게 만드는 원인(최대전압강하 42%)이 되며(t_3) 또다시 모터의 가속 토오크를 감소시키는 것이다. 이러한 과정을 반복하면서 모터의 운전전류는 모터의 토오크와 부하토오크가 일치하는 새로운 평형점을 향해 증가한다. 이후 추가기동모터의 기동완료 후(t_4) 전압이 다시 74%까지 회복하면 모터 운전전류는 다시 새로운 전압-전류 곡선을 따라 급격히 증가하는 특성을 보이게 되며 모터는 다시 가속토오크를 회복하여 슬립이 감소하면서 모터의 전류는 새로운 평형점을 찾아 감소하게 된다.



〈그림 6〉 전압 변화에 따른 모터 전류-토오크의 변화

2.4 대책

D취수장의 모터 추가 기동 실패는 다음과 같은 과도한 전압강하가 그 원인이다.

- 변압기 용량 대비 단위 모터용량 과다로 인한 기동전류 과다
- 장거리 배전선로 및 선로 굵기 문제로 인한 전류용량 부족

따라서 따라서 이 문제를 해결하기 위해서 다음과 같은 방안이 제시되었고 각 방안에 대하여 PTW를 이용하여 전압강하 개선효과를 계산하였다.

2.4.1 배전선로 굵기 상향 조정

현재 배전선로는 ACSR 160㎟가 사용되고 있으며 이를 가장 큰 용량인 240㎟로 굵기를 상향 조정할 경우 선로 임피던스가 26% 정도 줄어들기 때문에 전압강하 개선 효과가 있다. 배전선로 굵기별 전압강하율 시뮬레이션 결과 모터 2대 상시운전 기준으로 기동시 5% 정도의 전압강하 개선효과가 있었다. 다만 배전선로의 굵기를 변경할 경우 기존 전주의 풍압하중, 전주 사이의 경간 및 정전공사에 대비한 예비선로 이용가능성 등이 고려되어야 하며 이 경우 공사비가 과다하므로 현실적인 대안은 아니다.

2.4.2 변압기 탭 조정

현재 D취수장 주변압기(22.9/6.6kV)를 3번인 21,900V 탭에 설정할 경우 대략 4.37%정도의 전압상승 효과가 있으며, 시뮬레이션 결과 모터 2대 상시 운전 기준으로 기동시 2%의 전압강하 보상효과가 있음을 알 수 있다. 변압기 탭조정에는 특별한 비용이 소요되지 않는 장점이 있다. 다만 상시 과전압인가에 따른 위험요소를 고려해 볼 필요가 있으나 배전선로가 장거리이고 이로 인한 상시 전압강하가 큰 점을 고려해 볼 때 특별히 문제가 될 정도는 아니다.

2.4.3 Soft Starter를 이용하는 방법

소프트스타터를 이용하여 기동전류를 정격전류의 2배로 제한하여 기동할 경우의 전압강하의 크기를 시뮬레이션한 결과 모터 2대 운전 기준으로 약 14% 전압강하 보상효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다.

2.4.4 Inverter를 이용하는 방법

인버터는 유도전동기의 가변속 운전이 가능하여 밸브의 개폐없이 물량 조절이 가능하므로 효율이 높아 전력요금을 절감할 수 있으며 기동시 소프트스타터와 같이 정격전류의 1.5~2배 정도의 낮은 전류로 기동할 수 있어 기동전류가 적으므로 전압 강하가 작은 장점이 있다. 인버터를 이용하여 기동전류를 정격전류 이내(100%)로 제한하여 기동할 경우의 전압강하의 크기를 시뮬레이션한 결과 모터 2대 운전 기준으로 대략 20% 의 전압강하 보상효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다.

2.4.5 배전선로용 자동전압조정기를 이용하는 방법

배전선로 전압강하 보상용 자동전압조정기는 22.9kV 배전선로에 설치한 탭절환 단권변압기로서 배전선로의 전압을 상시 감시하여 전압이 설정치를 벗어난 경우 설정 시간(3~30sec) 후 전압이 규정치 이내에 유지 되도록 자동적으로 탭을 절환하여 전압을 조정 할 수 있는 장치이다. 그러나 기동시에 발생하는 수초 동안의 전압강하는 보상할 수 없기 때문에 기동용 전압강하보상기로서는 사용할 수 없고, 가격이 고가인 단점이 있다. 다만 배전선로의 길이가 길어 모터 운전시 큰 전압강하가 상시 발생하는 곳에 적용할 필요가 있으며, 아울러 향후 3대 상시 운전을 목표로 할 경우 본 전압강하보상기가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

3. 결 론

장거리 배전선로를 이용하여 대용량 모터를 기동할 경우에 발생할 수 있는 모터 기동불능 현상에 대한 원인 분석결과 기동전류에 기인한 과도한 전압강하가 그 원인으로 분석되었으며, 이에 대한 몇가지 대책을 제시하였고 Power Tools for Windows(PTW)를 이용하여 전압강하량에 대한 정량적인 분석을 시도하였으며, 분석 결과 소프트스타터 또는 인버터를 적용하는 방법이 가장 효과가 좋음을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Bhag S. Guru, “Electric Machinery and Transformer”, 3rd Ed

[2] Adel A. Shaltout, “Nalysis Of Torsional Torques In Starting Of Large Squirrel Cage Induction Motors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, March 1994 135

[3] John Larabee, et al, “Induction Motor Starting Methods And Issues”, IEEE Paper No. PCIC-2005-24

[4] charles I. Hubert, “Electric Machines - Theory , Operation, adjustment, and Control”, 2nd Ed