

대용량 유도전동기 기동특성 분석

이은춘 차장 (한국수자원공사 K-water 연구원), 김재철 교수 (송실대학교 전기공학과)

1. 서론

전동기는 부하의 요구에 따라 토오크를 내는 것인데, 토오크의 크기에 따라 속도가 변하는 것이 보통이다. 예를 들면 4극 60 Hz인 유도전동기가 토오크 Zero일 때는 대략 1,800 rpm으로 회전한다. 여기에 부하를 증가시키면 어느 값까지는 회전속도가 내려가면서 토오크는 증가하지만 점점 부하가 늘어나면 최대 토오크의 한계에 도달하여 그 이상에서는 전동기가 정지한다. 이처럼 전동기 속도와 토오크 관계를 나타낸 것이 전동기의 속도-토오크 곡선이며, 전동기의 특성을 결정하는 중요한 요소로 작용한다.

본 연구에서는 상수도 취수장 및 산업설비 등에 많이 이용되는 대용량 유도전동기의 기동특성에 대한 이론과 실제 (6,600 V, 3,800 kW, 취수펌프용) 운전특성을 측정, 분석하여 최적 운영방안에 활용코자 한다.

2. 전동기 기동특성

2.1 전동기 토오크의 종류

1) 기동 토오크 (Locked Rotor Torque or Starting Torque)

정격전압, 정격주파수에서 전동기의 회전자

가 정지상태에서 회전하려고 할 때에 발생하는 토오크로써 기동토오크 또는 시동토오크라 하며, 회전자의 구조에 따라 그 크기는 다르게 나타난다.

2) 최소 토오크 (Pull Up Torque or Minimum Torque)

전동기가 정지상태부터 최대 토오크에 상당하는 회전속도 사이에서 발생하는 토오크의 최소치를 말하며, 일반적으로 기동 토오크의 70~80% (2중농형)와 100% (심구농형)로 나타난다.

3) 최대 토오크 (Breakdown Torque or Maximum Torque)

전동기의 부하를 순차적으로 증가시키면 Slip이 커져 결국 멈춰버린다. 이것은 전동기로 그때의 부하를 더 이상 돌릴 수 없기 때문이고, 정지하기 바로 전의 토오크 값을 최대 토오크라 한다.

4) 정격 부하 토오크 (Full Load Torque)

정격 토오크는 전동기의 정격출력에 상응하는 부하를 전동기의 극수 및 Slip에 따라 정해지는 회전속도에서 운전할 때의 회전력 (kg · m)으로 표시되며, 정격 부하 토오크 T_r 은 식 (1)과 같이 계산한다.



$$Tr = \frac{Pr \cdot 1,000}{9.8 \cdot 2\pi \frac{Nr}{60}} = 974 \frac{Pr(kW)}{Nr} (kg \cdot m) \quad (1)$$

여기서, P_r : 정격출력 (kW)
 N_r : 정격회전속도 (rpm)

마찬가지로 부하기계에도 전동기와 같은 속도-토크 곡선이 있다. 가령 펌프를 돌리기 시작할 순간에는 거의 토크를 필요로 하지 않지만 속도가 빨라짐에 따라 현저하게 토크를 필요로 한다. 이처럼 부하기계를 구동하는데 필요한 토크도 속도에 따라 변화하는 것이 일반적이다. 전동기와 부하의 속도-토크 곡선은 그림 1과 같다.

2.2 유도전동기 기동시간

전동기가 정지상태에서 속도 N_m 으로 가속하는데 필요한 시간은 GD^2 및 가속 토크 (T_a)에 의해 결정된다. 기동시간 (t)은 식 (2)와 같다.

$$T_m - T_{la} = T_a = J \frac{dw}{dt} \quad (2)$$

여기서, $J = 1/4 GD^2$, $\omega = 2\pi n/60$ 라고 하면, 전동기 정지상태에서 정격속도 (N_m)까지 가속하는데 필요한 시간 (t)은 식 (3)과 같다.

$$dt = J \frac{dw}{T_a} = \frac{1}{4} GD^2 \times \frac{(2 \times 3.14 \times n)}{60 \times 9.8 T_a}$$

$$t = \frac{GD^2}{375} \int_0^{N_m} \frac{dn}{T_a} = \frac{GD^2 \cdot N_m}{375 \cdot T_a} \quad (3)$$

여기서, GD^2 : [전동기의 GD^2] + [전동기 축으로 환산한 부하의 GD^2] ($kg \cdot m^2$)
 T_a : 가속 토크 ($kg \cdot m$)
 N_m : 회전속도 (rpm)

그리고 평균 가속 토크 T_a 는 모터 토크 (T_m) 선도에서 펌프부하 토크 (T_{la}) 선

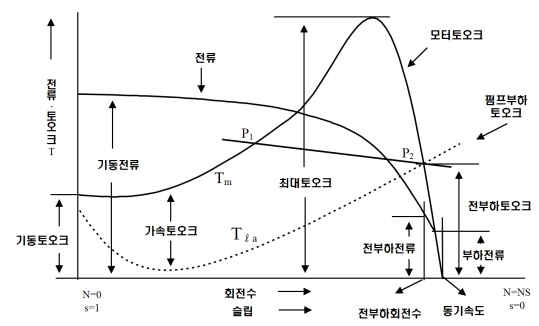


그림 1. 펌프 · 전동기 속도-토크 곡선.

도를 뺀 면적에 상당하는 토크 즉, 부하를 가속하기 위한 실제 토크의 평균치를 말하고, 모터의 토크 곡선을 T_m , 펌프부하의 토크 곡선을 T_{la} 라 하면, 식 (4)에 의하여 전동기의 정격회전속도 N_m (rpm)까지의 기동시간을 계산할 수 있다.

$$t = \frac{GD^2}{375} \int_0^{N_m} \frac{dn}{T_a} = \frac{GD^2 \cdot N_m}{375 \cdot T_a}$$

$$= \sum \frac{GD^2 m + GD^2 l}{375} \cdot \frac{Nm}{T_m - T_{la}} (Sec) \quad (4)$$

2.3 전동기의 기동시간 계산 예

한강수계에 위치한 취수펌프용 대용량 유도전동기의 기동시간 계산 대상은 표 1과 같고, 가속 토크 계산결과는 표 2와 같다.

위 펌프 · 모터 규격과 가속토크로부터 기동리액터의 각 T_{ap} 별 기동시간 (t)을 식 (4)를 이용하여 계산하면 아래와 같이 산출된다.

1) 80%탭 리액터 기동시의 기동시간 (t)

- ① 전동기의 $GD_m^2 = 6,310 (kg \cdot m^2)$
- ② 부하 (펌프)의 $GD_l^2 = 748 (kg \cdot m^2)$
- ③ 전동기의 정격회전속도
 $N_m = 592 (rpm)$
- ④ 전동기의 발생평균 Torque
 $T_m = 4,368 (kg \cdot m)$
- ⑤ 펌프의 반항평균 Torque
 $T_{la} = 1,184 (kg \cdot m)$



표 1. 전동기 기동시간계산 대상.

구분		정격	비고
유 도 전동기	정격출력 (kW)	3,900	5,200 (Hp)
	정격전압 (V)	6,600	(3상)
	정격전류 (A)	418	
	기동전류 (A)	2,506	
	정격 토크 (kg·m)	6,415	T _N
	기동 토크 (kg·m)	5,770	T _N 의 90%
	최대 토크 (kg·m)	12,830	T _N 의 200%
	전부하 효율	97.2	
	전부하 역률	84	
GD ² (kg·m ²)	6,310	GDm ² ①	
펌프 (취수용)	유량 (m ³ /분)	13,781	
	양정 (m)	80	
	100%회전토크 (kg·m)	5,398.8	
	GD ² (kg·m ²)	748	GDt ² ②
	회전수 (rpm)	592 (12극)	N _m ③

표 2. 물리량(가속 토크) 계산결과.

구분		토크 (kg ² m)	비고	
④ (T _m) 모타 발생 평균 토크	정격 발생토크 (a)	6,415	기준100% (성적서 참조)	
	평균토크 비율 (b)	106.25 (%)	Motor S-T Curve 계산	
	전전압 기동시 (c)	6,815.9	c=a×b, (T _n [*] b%)	
	리액터 기동시	80%Tap (d)	4,368	d=c×0.8 ²
		75%Tap (e)	3,834	e=c×0.75 ²
		70%Tap (f)	3,340	f=c×0.70 ²
⑤ (T _a) 펌프 반항 평균 토크	정격 반항토크 (g)	5,398.8	기준 100% (Pump 참조)	
	평균토크 비율 (h)	21.93 (%)	전폐조건 (S-TCurve)	
	펌프 반항토크 (i)	1,184	i=g×h, (T _a)	
가속 토크 (T _a)	80%탭 (j)	3,184	j=d-i	
	65%탭 (k)	2,650	k=e-i	
	50%탭 (l)	2,156	l=f-i	

*) 전동기 및 펌프의 평균토크는 공장시험성적서의 속도-토크 곡선 활용.

기동시간 t (sec)

$$= \frac{(6,310kg\ m^2 + 748kg\ m^2) \times 592rpm}{375 \times (4,368 - 1,184)kg\ m} = 3.5sec$$

2) 75%탭 리액터 기동시의 기동시간 (t)

- ① 전동기의 GD_m² = 6,310 (kg·m²)

- ② 부하 (펌프)의 GD_t² = 748 (kg·m²)

- ③ 전동기의 정격회전속도

$$N_m = 592 (rpm)$$

- ④ 전동기의 발생평균 Torque

$$T_m = 3,834 (kg \cdot m)$$

- ⑤ 부하 (펌프)의 반항평균 Torque

$$T_{ta} = 1,184 (kg \cdot m)$$

기동시간 t (sec)

$$= \frac{(6,310kg\ m^2 + 748kg\ m^2) \times 592rpm}{375 \times (3,834 - 1,184)kg\ m} = 4.2sec$$

3) 70%탭 리액터 기동시의 기동시간 (t)

- ① 전동기의 GD_m² = 6,310 (kg·m²)

- ② 부하(펌프)의 GD_t² = 748 (kg·m²)

- ③ 전동기의 정격회전속도

$$N_m = 592 (rpm)$$

- ④ 전동기의 발생 평균 Torque

$$T_m = 3,340 (kg \cdot m)$$

- ⑤ 부하(펌프)의 반항 평균 Torque

$$T_{ta} = 1,184 (kg \cdot m)$$

기동시간 t (sec)

$$= \frac{(6,310kg\ m^2 + 748kg\ m^2) \times 592rpm}{375 \times (3,340 - 1,184)kg\ m} = 5.2sec$$

리액터 기동방식에서 각 Tap별 기동시간 계산 결과를 비교해 보면, 감전압 값이 클수록 기동시간이 길게 소요되었다. 이와 같은 이유는 기동 토크와 밀접한 관계가 있으며, 전동기 기동 회로에서 기동시간 설정 시 중요한 자료로 활용된다.



3. 전동기 기동특성 시험

3.1 시험방법

전동기의 기동특성을 알아보기 위하여 취수장 고압유도전동기를 대상으로 현장시험을 실시하였다. 시험 방법은 기동반 단말부에 정밀급 (0.5급)의 PT (6.6 kV/110 V), CT Clamp (1,000 A), 비접촉식 RPM Sensor 등의 기동특성 시험장비를 설치하고, 기동리액터 Tap을 80%, 75%, 70%로 변경하면서 시험하였으며, 기동반 시험회로도 는 그림 2와 같고, 시험장면은 그림 3과 같다.

3.2 시험 결과

1) 80% 기동용 리액터 Tap

현재 운용중인 취수장의 펌프-모터는 리액터에 의한 감전압기동방식을 채택하고 있으며, 서지탱크 수위 S.T.L 94.00 m 및 80% 기동용 리액터 Tap에서 기동시 전압, 전류, RPM 등의 기동특성 측정결과는 그림 4와 같다.

- ① 기동전압은 5.2 kV (실효치)로써 운전 전압 6.6 kV (실효치)의 79%로 측정되어, 감전압 Tap 80%와 거의 같은 값으로 측정되었다.
- ② 기동전류는 1,624 A (실효치)로써 이론적인 직입기동전류 (2,506 A)의 65%로 감전압 Tap 80%보다 다소 낮은 값으로 측정되었다.
- ③ 기동시간은 기동후 7.5초 후에 정격속도에 근접함에 따라 이상적으로 정격전압/전류에 근접하고, 기동후 8.3초 후에 정격속도 (592 rpm)에 도달하였다. 그리고 기동후 10.2초 후에 직입용 VCB가 투입되는 것으로 측정되었으며, 이러한 현상은 이론적 기동시간인 3.5초 보다 상당히 지연된 것으로 분석된다.
- ④ 전동기 기동시 펌프의 토출밸브 개방은 기동후 약 7.0초로 정격속도 도달 (8.3

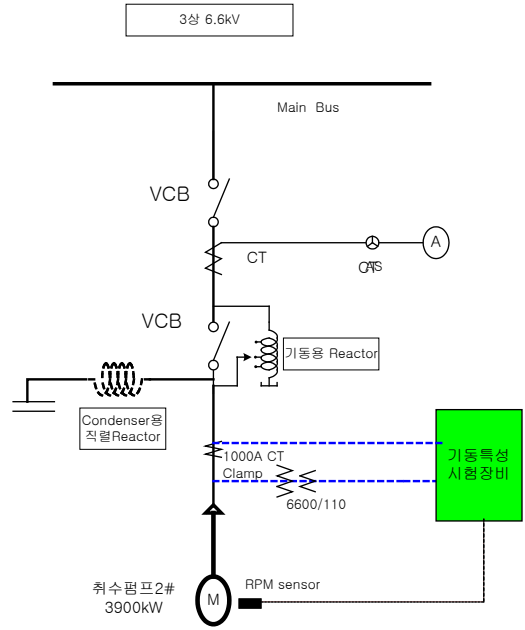


그림 2. 전동기 기동반 시험 회로도.

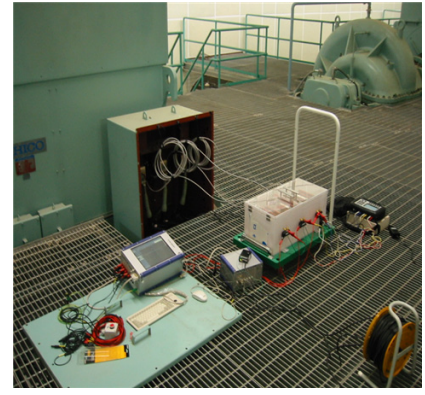


그림 3. 전동기 기동특성시험 장면.

초)전에 개방됨으로 기동시간 지연의 부분적 요소로 작용함을 알 수 있다.

2) 75% 기동용 리액터 Tap

서지탱크 수위 S.T.L 94.00 m 및 75% 기동용 리액터 Tap에서 기동시 전압, 전류, RPM 등의 기동특성 측정결과는 그림 5와 같다.

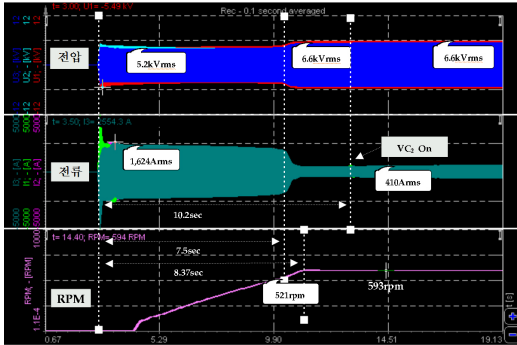


그림 4. 전동기 기동특성 (Reactor Tap 80%, S.T.L 94.00 m).

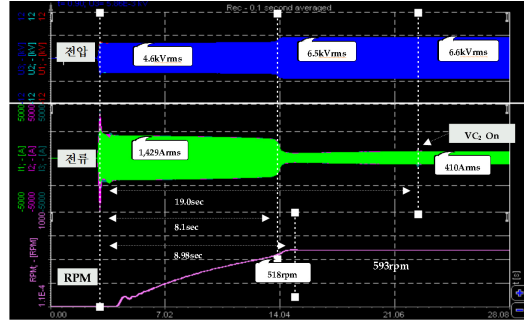


그림 6. 전동기 기동특성 (Reactor Tap 70%, S.T.L 99.50 m).

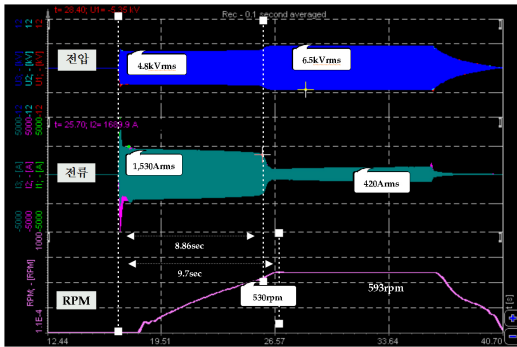


그림 5. 동기 기동특성 (Reactor Tap 75%, S.T.L 94.00 m).

- ① 기동전압은 4.8 kV (실효치)로써 운전 전압 6.6 kV (실효치)의 73%로 측정되어, 이론상의 75%와 거의 같은 값(73%)으로 분석된다.
- ② 기동전류는 1,530 A (실효치)로써 이론적인 직입기동전류 (2,506 A)의 61%로 이론상의 75%보다 다소 낮은 값으로 측정되었다.
- ③ 기동시간은 기동후 8.86초 후에 정격속도에 근접함에 따라 이상적으로 정격전압/전류에 근접하고, 기동후 9.7초 후에 정격속도 (592 rpm)에 도달하였다. 그리고 기동후 직입용 VCB가 투입은 측정되지 않았다. 또한, 이론적 기동시간인 4.2초 보다 상당히 지연된 것으로 분석

된다.

- ④ 전동기 기동시 펌프의 토출밸브 개방시간은 기동후 약 7.0초로써, 정격속도 도달 (9.7초)전에 개방됨으로 기동시간 지연의 부분적 요소로 작용함을 알 수 있다.

3) 70% 기동용 리액터 Tap

서지탱크 수위 S.T.L 95.70 m 및 70% 기동용 리액터 Tap에서 기동시 전압, 전류, RPM 등의 기동특성 측정결과를 그림 6과 같다.

- ① 기동전압은 4.6 kV (실효치)로써 운전 전압 6.6 kV (실효치)의 70%로 측정되어, 이론상의 70%와 같은 값으로 측정되었다.
- ② 기동전류는 1,429 A (실효치)로써 이론적인 직입기동전류 (2,506 A)의 57%로 이론상의 70%보다 다소 낮은 값으로 측정되었다.
- ③ 기동시간은 기동후 10.86초 후에 정격속도에 근접함에 따라 이상적으로 정격전압/전류에 근접하고, 기동후 11.5초 후에 정격속도 (592 rpm)에 도달하였다. 그리고 기동후 19.0초에 직입용 VCB가 투입되는 것으로 측정되었으며 이론적 기동시간인 5.2 sec 보다 상당히 긴 것으로 분석된다.



④ 전동기 기동시 펌프의 토출밸브 개방시간은 기동후 약 11.0초로, 정격속도 도달(11.5초)과 거의 동시에 개방됨으로 이상적인 기동조건으로 기동시간이 조금 단축됨을 알 수 있다.

정격속도에 근접함에 따라 자연적으로 정격전압, 전류에 수렴되는 이유는 패러데이 법칙(Faraday's law)에 의하여 자속 쇄교수와 시간적 변화율이 역기전력이므로 리액터를 통과하는 시간적 전류변화율에 비례함으로 전동기 기동전류의 급격한 감소로 인하여 기동 후 약 몇 초까지만 리액터에 의한 감전압 현상이 나타난다.

3.3 시험결과 고찰

펌프-전동기의 주된 열화요인 및 고장발생 원인을 도출하고자 취수장의 고전압전동기를 대상으로 기동전압, 기동전류, 이상전압 발생정도, 기동시간, 정격속도 도달시간 및 직입용 차단기 투입시간 등의 기동특성을 측정, 분석한 결과 다른 항목은 이론 값과 비슷한 특성을 보였으나, 기동시간은 표 3과 같이 많은 차이를 나타냈다.

이와 같은 이유는 전동기 제조사에서 제시한 각종 물리량의 차이에 의하여 발생할 수도 있으나, 펌프 토출측 밸브의 개도(Open) 시간과도 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 취수장별로 운영특성을 감안한 밸브의 최적 개도시간 선정 연구가 수반되어야 한다.

4. 결론

취수펌프용으로 이용되는 고압 대용량 유도전동기의 기동특성에 대하여 문헌에서 제시하는 계산방법과 현장설비를 대상으로 측정한 결과를 비교 분석하면 다음과 같다.

기동시 전압특성은 기동용 리액터의 각

표 3. 기동시간 계산 값과 정격속도 도달시간 비교.

측정 항목		유도전동기 기동반 리액터 tap		
		80%	75%	70%
기동 시간 (sec)	기동시간 계산 값	3.5	4.2	5.2
	정격속도 도달시간	8.3	9.7	11.5

Tap별 기동전압은 일정 비율로 감압되어 이론적 계산 값과 시험 값이 거의 일치함을 보였으며, 기동시 전류특성은 기동용 리액터의 80%, 75%, 70% tap에서 설계 값 보다 다소 낮은 값으로 측정되어 기동시간이 지연되는 것으로 판단되며, 특히 70% Tap에서 리액터의 진동이 크게 발생되어 기계적 열화요인으로 작용하므로 상위 Tap으로 변경하여 운영토록 개선안을 제시하였다.

또한, 기동시간의 경우 기동후 정격속도에 근접함에 따라 이상적으로 정격전압, 전류에 수렴함을 보였고, 그 후에 정격속도에 안정적으로 도달하였다. 그러나 이론적 기동시간 보다 상당히 늦게 정격속도 도달하여, 기동반 제어회로 구성시 기동시간 설정에 상당한 주의가 요망된다.

본 연구결과, 물리량을 이용한 계산에 의한 기동시간 산출법과 실제 정격속도에 도달하는 기동시간과는 많은 차이가 있음을 알았으며, 이에 대한 차이발생 원인과 토출밸브 최적제어 방안 등에 대한 연구가 후속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] K-water연구원, 『대용량전동기 기동특성 분석 보고서』, 2012
- [2] IEC 60282-1, 『High-voltage fuses - Current limiting fuses』, 2002
- [3] 技多利, 『電氣設備技術計算 Hand Book』, 1993
- [4] 朴旻鎬, 『誘導機器』, 1998



[5] 이은용, 『고압전동기용 진공차단기의 스위칭서지 해석 및 저감방안 연구』, 1993.

저자약력



성명 : 이은춘

◆ 학력

- 1992년 한밭대학교 공과대학 전기공학과 공학사
- 2006년 충남대학교 산업대학원 전기공학과 공학석사
- 2013년 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

◆ 경력

- 1988년 - 현재

한국수자원공사 K-water연구원 차장



성명 : 김재철

◆ 학력

- 1979년 송실대학교 공과대학 전기공학과 공학사
- 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사
- 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1988년 - 현재
- 2012년 - 현재

송실대학교 전기공학과 교수
송실대학교 공과대학장

