

리액터 탭 절환에 의한 유도전동기의 기동 특성

Starting Characterization of Induction Motor using Reactor Tap Change

김 중 겹^{*}
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - An induction motor is most widely used to obtain driving force in the industrial field. The induction motor is generated a high current at starting. A starting current is often more than five times of rated current. A high starting current can cause problems such as voltage drop in the power system. In order to solve these problems, a reactor starting method has been widely applied in a large motor capacity. There are differences in the operating characteristics of induction motor corresponding the switching time of reactor tap. In this study, I analyzed that current, torque, power of induction motor are different from changing time and tap setting values of reactor tap.

Key Words : Induction motor, Reactor, Starting current, Tap change, Torque

1. 서 론

유도 전동기는 튼튼하고 가격이 저렴하여 산업현장에서 회전부하의 원활한 구동에 가장 많이 사용하고 있다[1~4]. 유도전동기는 부하용량이 작거나 속응성을 요구하는 경우 직입기동을 적용하지만, 직입 기동은 높은 기동전류의 발생 때문에 연결된 시스템에 전압 강하를 일으킬 우려가 있다. 이에 대한 대안으로 Y/D, 리액터, 소프트 스타터 기동방식이 적용되고 있다[1~5]. 전동기 용량이 작은 경우 직입기동이나 소프트 스타터 기동 방식이 적용 가능하지만, 전동기 용량이 큰 경우에는 경제적인 측면에서 아직도 리액터 기동 방식을 많이 적용하고 있다[1~3].

리액터 기동은 정격속도의 1/3에 해당되는 지점에서 탭과 병렬로 연결된 스위치를 투입하여 운전하는 방식이다. 이때 투입하는 스위치는 속도의 설정이 아닌 시간 스위치를 이용하여 전동기에 전원을 공급한다. 이때 적절한 절환시간 조정이 이루어지지 않을 경우 적절한 토크 확보와 기동 전류 저감에 어려움이 발생할 수 있다.

유도전동기의 안정적인 동작 확보를 위해서는 리액터의 탭 설정과 절환시간 등의 설정이 중요한 변수가 되므로 본 연구에서는 탭 조정과 탭과 부하의 절환시간에 따라 전력, 역률, 토크 및 전류의 변화에 대해 분석하였다.

2. 리액터 기동 및 파라미터 계산

2.1 리액터 기동방식

유도전동기에 리액터를 적용하는 것은 기동전류를 감소시

켜 전동기 및 전원에 충격을 줄이기 위한 것이다. 전동기 기동 회로에 직렬로 리액터를 삽입하여 기동하고 속도가 어느 정도 가속되어 전류가 감소하면 리액터와 병렬로 설치된 스위치를 투입 시키는 방식으로 기동 토크는 전압의 2승에 비례하기 때문에 직입 기동 방식에 비하여 감소된다.

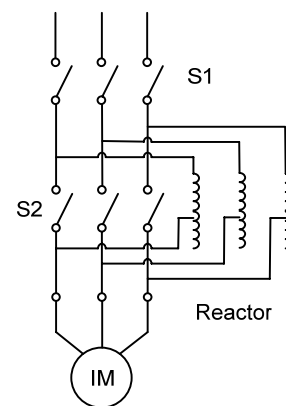


그림 1 리액터 기동 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of reactor starting

그림 1은 리액터 기동방식의 회로도로서 S1 스위치를 닫은 후 리액터를 통해 전동기에 전류가 흐르게 한 다음 정격속도의 약 1/3에 도달할 경우 스위치 S2를 닫아 전동기가 지속적으로 운전하게 된다.

그림 1과 같은 유도전동기를 리액터 기동방식으로 운전할 경우 리액터의 용량산정이 필요하다. 리액터의 탭은 대부분 50%, 65%, 80%의 3부분으로 구성되어 있다. 이 3가지 탭의 리액턴스 값이 특성 해석에 필요하다.

유도전동기는 제작사, 용량, 극수 등에 따라 리액턴스 전압이 서로 다른데 이 리액턴스 전압이 유도전동기의 직입 기동 전류를 좌우하며 리액터 설계의 기초가 된다.

^{*} 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2013년 12월 2일

수정일자 : 2013년 12월 23일

최종완료 : 2013년 12월 27일

2.2 리액터 탭 파라미터[1,5]

유도전동기의 기동시 운전특성을 분석하기 위해서는 기동용 리액터의 파라미터 선정이 중요하다. 기동용 리액터의 파라미터 산정은 식 (1)과 같이 전동기의 정격전류 I_n 를 먼저 구한다.

$$I_n = \frac{P(W)}{\sqrt{3} \times V \times \cos\theta} [A] \quad (1)$$

유도전동기 기동전류 I_{st} 는 식 (2)와 같이 정격전류의 5~8배에 해당되므로 대개 제작사의 시험 성적서에 표기된 값을 선정하면 된다.

$$I_{st} = (5 \sim 8) \times I_n [A] \quad (2)$$

리액터로 기동할 경우 탭에 흐르는 전류는 식 (3)과 같이 전동기의 임피던스 Z_{mot} 와 리액터의 임피던스 Z_{tap} 으라도 구할 수 있다.

$$I_{tap} = \frac{V}{(Z_{tap} + Z_{mot})} \quad (3)$$

식 (3)의 경우에서와 같이 전동기의 임피던스를 구하는 것이 다소 불편하므로 식 (2)에서와 같이 전동기의 기동전류를 알 경우 쉽게 탭의 비율로 리액터 파라미터를 구할 수 있다. 리액터의 탭 전류 I_{tap} 는 기동전류에 탭 비율($\alpha\%$)의 곱으로 표현할 수 있다.

$$I_{tap} = \frac{\alpha}{100} \times I_{st} [A] \quad (4)$$

이때 탭 전압은 다음과 같다.

$$V_{tap} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V \times (100 - \alpha\%) [V] \quad (5)$$

따라서 탭의 임피던스 Z_{tap} 는 식 (4)와 (5)로부터 식 (6)과 같이 그리고 탭의 리액턴스 L_{tap} 는 식 (7)과 같이 구해진다.

$$Z_{tap} = \frac{V_{tap}}{I_{tap}} [\Omega] \quad (6)$$

$$L_{tap} = \frac{Z_{tap}}{\omega} [H] \quad (7)$$

3. 계산 및 결과 분석

해석에 사용한 3상 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

3.1 직입기동에 따른 동작 특성

직입 기동방식(DOL, Direct On Line Starting)은 전압강

표 1 유도전동기 파라미터

Table 1 Parameters of Induction motor

구분	Values
전압	460V
극수	4
용량	75kW
슬립	3%
효율	95%
역률	87%
정격전류	108.2[A]

하에도 불구하고 속응성이 요구되는 곳에 많이 적용되고 있다. 따라서 부하는 기동 초기부터 연결한 상태에서 운전을 시작한다.

유도전동기가 안정적인 운전을 하기까지 필요한 기동시간 t_{acc} 는 다음과 같이 계산할 수 있다[2,4].

$$t_{acc} = \frac{\sum J \times N}{9.55 \times T_A [Nm]} \quad (8)$$

여기서 T_A 는 평균 가속 토크로서 전동기의 평균 토크 T_Q 와 부하의 평균 토크 T_L 의 차이이다. 또한 J 와 N 은 회전체의 관성모멘트와 회전수이다.

유도전동기의 동작 특성 해석에는 전자계 과도해석 프로그램(EMTP)을 적용하였다[6].

그림 2는 표 1의 파라미터를 사용해서 직입 기동시의 전력, 토크 그리고 기동전류를 회전속도에 따라 해석한 것이다. 해석에서 부하는 기동 초기부터 연결하였다. 그림 2(a)의 가로축은 회전속도[rpm]이고, 좌측은 유효전력(P1:○), 무효전력(Q1:□) 및 피상전력(S1:△)이며, 우측은 역률(PF1:×)이다. 또한 그림 2(b)의 좌측은 토크(TQ:○), 우측은 전류(IS:□)를 나타내고 있다.

그림 2(a)에서 기동시 유효전력보다 무효전력이 높지만, 정상속도에 가까워지면서 반전되어 역률이 점차 높아짐을 알 수 있다. 그림 2(b)에서 기동 토크는 정격 속도에서의 토크에 비해 약간 높은 편이고, 기동시의 전류는 운전속도에서의 전류에 거의 7배에 해당되는 것을 알 수 있다. 그리고 정격 속도에서는 정격 토크와 운전 전류에 해당되는 안정된 값을 나타내고 있다.

직입기동에 사용된 관성 모멘트, 회전속도 및 가속 토크의 파라미터를 식 (8)에 대입하여 계산하면 그림 2에서와 같이 약 2.4초 이후부터 정상적인 속도에 도달함을 확인할 수 있다. 그러나 기동초기에 부하를 연결하지 않고 일정 속도에 도달할 때 부하를 연결할 경우 정상 속도에 도달하는 시간은 달라질 수 있다.

3.2 리액터 탭 조정에 따른 동작 특성

직입 기동에 의한 유도전동기 특성 해석에서 구한 기동 전류값을 가지고서 3부분(50%, 65%, 80%)의 탭의 설정값 변경에 따라 특성 변화를 분석하였다.

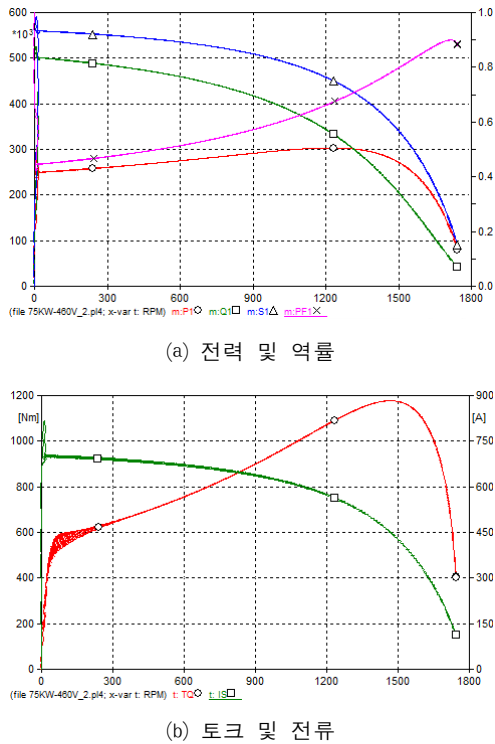


그림 2 직입 기동시의 동작 특성
Fig. 2 Operating characteristics at DOL

3.2.1 50% 탭 사용시

직입 기동시 기동전류에 의한 전압강하와 높은 기동 토크로부터 기기의 보호와 시스템의 안정성을 높이기 위해 리액터의 탭은 세 부분으로 사용할 수 있도록 제작하고 있다. 표 2는 그림 2와 같은 직입 기동시의 높은 기동전류를 줄이기 위해 사용하는 리액터의 탭의 세 부분에 대한 임피던스와 리액턴스 값을 식 (4)~(7)을 적용하여 계산한 것이다.

표 2 탭 설정에 따른 파라미터 산정

Table 2 Parameters calculation using Tap change

구분	50%	65%	80%
$I_{tap} [A]$	351.6	457.1	562.6
$V_{tap} [V]$	132.8	92.9	53.1
$Z_{tap} [\Omega]$	0.378	0.203	0.094
$L_{tap} [mH]$	1	0.5394	0.2504

전동기 파라미터와 전동기와 부하의 관성 모멘트 등을 고려하여 탭을 설정하는 것이 기동 전류의 저감과 토크의 안정성 확보에 도움이 된다.

탭을 이용하여 기동할 경우 초기부터 부하를 연결하면 토크 확보가 어려우므로 대개 동기속도의 75%에 가까울 때 부하를 연결하였다.

우선 그림 3에서는 리액터 탭을 50%에 세팅하여 기동한 후 정격속도의 75%에 도달하는 시간이 약 3.1초 이므로 이때 부하를 연결하여 운전하였다.

그림 3의 가로축은 회전속도[rpm]이고, 그림 3(a)의 좌측

은 유효전력(P1:○), 무효전력(Q1:□) 및 피상전력(S1:△)이며, 우측은 역률(PF1:x)이다. 또한 그림 3(b)의 좌측은 토크(TQ:○), 우측은 전류(IS:□)를 나타내고 있다.

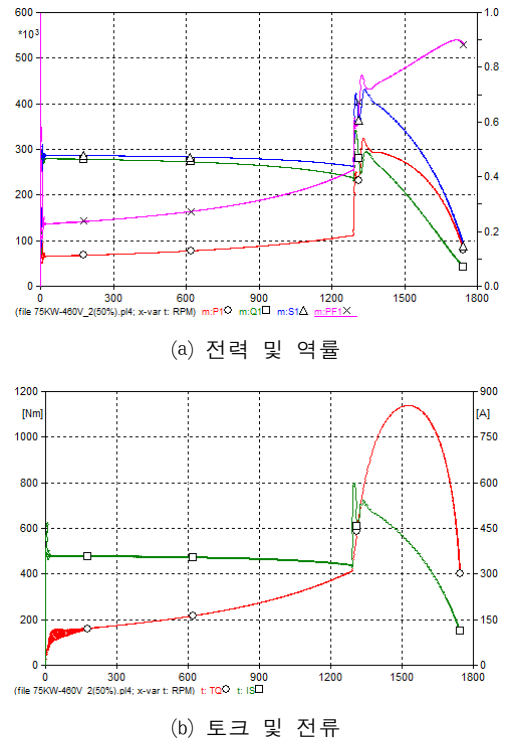


그림 3 50% 탭 설정에 따른 동작 특성
Fig. 3 Operating characteristics at 50% tap setting

그림 3에서와 같이 탭을 50% 설정한 경우 기동전류는 정격속도에 도달하기 전에 직입기동에 대해 50%로 그리고 기동토크는 25%도 줄어들지만, 정격운전 상황에 도달하는 시간은 더 늘어난 것을 확인할 수 있다. 또한 리액터로부터 절환시에 전력 및 전류의 크기가 순간적으로 높아짐을 알 수 있다. 이때 역률도 직입 기동에 비해 낮게 시작하여 절환이 후에는 안정적으로 확보됨을 알 수 있다. 또한 정격속도에서는 직입 기동의 운전조건과 동일하게 진행됨을 알 수 있다.

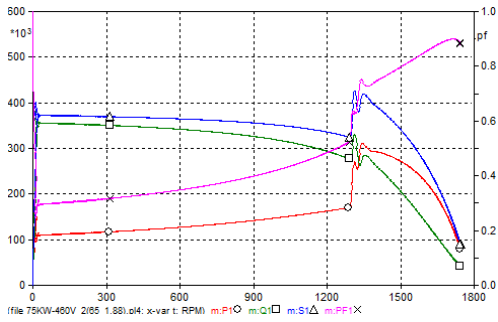
3.2.2 65% 탭 사용시

그림 4는 유도전동기를 65%탭으로 기동 후 정격속도의 75%에 도달하는 1.88초 후 절환하여 운전하는 경우의 해석 예이다. 단 부하도 1.88초 후에 같이 연결하였다.

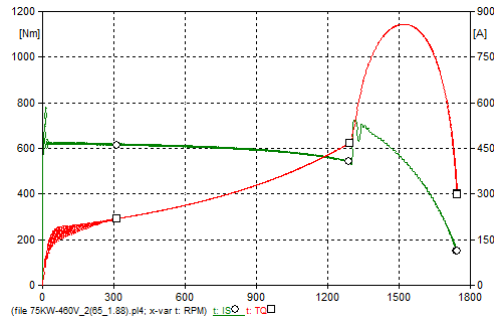
그림 4의 가로축은 회전속도[rpm]이고, 그림 4(a)의 좌측은 유효전력(P1:○), 무효전력(Q1:□) 및 피상전력(S1:△)이며, 우측은 역률(PF1:x)이다. 또한 그림 4(b)의 좌측은 토크(TQ:□), 우측은 전류(IS:○)를 나타내고 있다.

기동 초기 리액터에서 회전속도가 75% 근처에서 절환시 전력, 토크 및 전류의 변화가 50% 탭 설정시에 비해서는 다소 낮게 나타난다.

65%의 리액터 탭 설정으로 운전할 경우 직입기동과 50% 탭 설정에 비해 기동전류와 토크는 약간 증가하지만, 기동시간은 약간 짧아진 것을 확인할 수 있다.



(a) 전력 및 역률



(b) 토크 및 전류

그림 4 65% 탭 설정시에 따른 동작 특성
Fig. 4 Operating characteristics at 65% tap setting

3.2.3 80% 탭 사용시

그림 5는 리액터 탭(80%)에 의한 기동 후 정격속도가 75%에 도달하는 1.29초 후 절환하여 운전하는 경우의 해석에이다. 또한 부하도 1.29초 후에 연결되는 것으로 하였다.

그림 5의 가로축은 회전속도[rpm]이고, 그림 5(a)의 좌측은 유효전력(P1:○), 무효전력(Q1:□) 및 피상전력(S1:△)이며, 우측은 역률(PF1:×)이다. 또한 그림 5(b)의 좌측은 토크(TQ:○), 우측은 전류(IS:□)를 나타내고 있다.

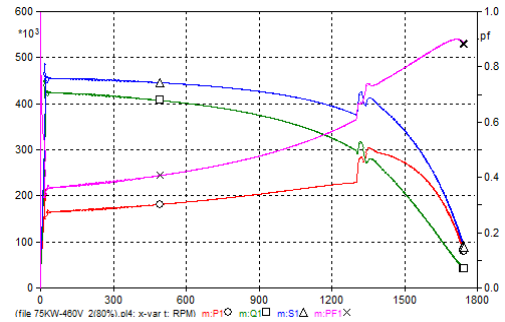
탭을 80%로 설정한 경우 직입기동에 비해 전류를 같은 비율로 감소하고 기동토크는 제품에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있지만, 50%와 65%에 비해 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 기동 후 정상상태에 이르는 시간은 탭의 설정값이 증가함에 따라 다소 줄어든다는 것을 알 수 있다.

위의 3가지 계산에서 리액터 기동방식에서 다음과 같은 사실을 확인할 수 있다.

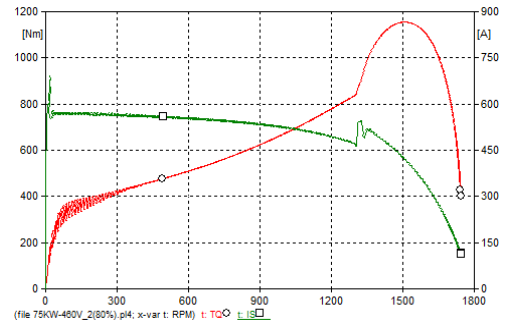
- ① 부하 연결은 리액터 탭 절환시 또는 이후에 이루어져야 안정적인 운전이 이루어질 수 있다.
- ② 탭 설정값이 높아질수록 빠른 시간에 정상토크를 확보하지만, 기동전류 및 기동 토크는 높아지게 된다.
- ③ 탭 설정값이 높을수록 절환시의 전력 및 전류의 변화 폭이 줄어들게 된다.

표 3은 기동 초기 리액터 탭의 변화에 대해 전력, 역률, 기동전류 및 토크의 크기를 직입 기동과 비교한 것이다.

표 3에서와 같이 리액터 탭의 설정값이 높을수록 전력 및 역률이 점차 높아지고, 토크의 크기는 전압의 제공에 전류는 전압 탭에 비례하여 증가함을 알 수 있다.



(a) 전력 및 역률



(b) 토크 및 전류

그림 5 80% 탭 설정에 따른 동작특성
Fig. 5 Operating characteristics at 80% tap setting

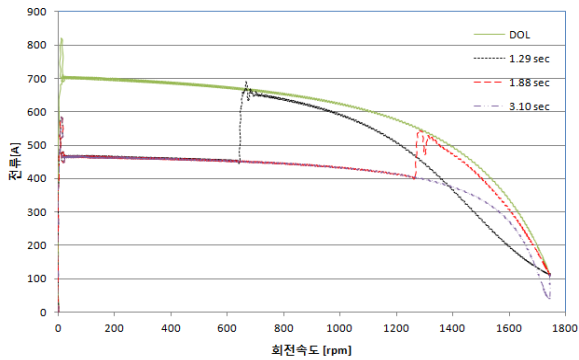
표 3 직입 및 리액터 기동시 전력, 역률, 토크 및 전류
Table 3 Power, pf, torque & current at the DOL and reactor starting

구분	P[kW]	Q[kVAr]	S[kVA]	pf	I_s [A]	T[Nm]
DOL	248	502	560	0.44	698	500
50%	65	277	285	0.23	350	120
65%	109	354	371	0.29	454	210
80%	164	423	454	0.36	558	310

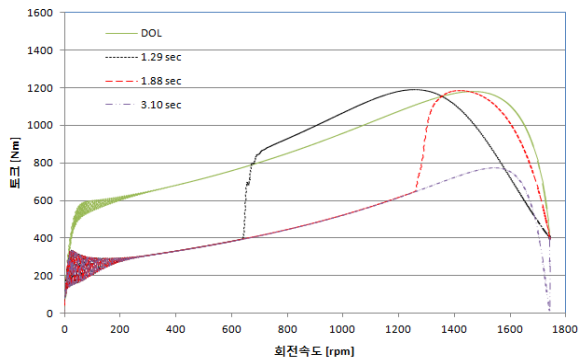
3.3 탭 절환 시간 변화에 따른 동작 특성

유도전동기 리액터 기동에는 탭이 3부분으로 구성되어 있지만, 이 중에서 65%의 탭을 설정하고 운전하는 경우가 많다. 그래서 이 조건에서 그림 6에서와 같이 리액터와 부하의 연결시간(1.29초, 1.88초, 3.1초)에 따라 전류와 토크의 변화를 직입 기동과 비교하였다.

그림 6에서와 같이 부하의 연결과 탭 절환시간 변화에 따라 전류와 토크의 크기가 서로 달라지는 것을 알 수 있다. 그림 6(a)의 경우 기동전류를 나타낸 것으로서 1.29초의 절환시간이 65% 탭의 설정시간 1.88초 보다 빠르게 설정할 경우 정격속도의 75% 이전에 절환되기 때문에 기동전류의 저감에 효과를 보지 못하며, 3.1초에 설정할 경우에는 기동전류의 저감에는 효과를 볼 수 있어도 무부하에 해당되는 영역을 지나 정격전류에 도달하기 때문에 감속영역에 이를 수 있다. 그림 6(b)의 경우 그림 6(a)와 같은 조건하에서 토크 변화를 나타낸 것이다. 가장 크게 토크를 확보할 수 있는 직입



(a) 전류



(b) 토크

그림 6 절환 및 투입시간 조정에 따른 전류 및 토크

Fig. 6 Current & torque according to the adjustment time & closing time

기동에 대해 절환시간이 다른 경우 최대 토크에 도달하는 회전속도가 다르고, 65% 탭의 절환보다 빠른 경우 정격속도 영역에서 토크 변화폭이 커며, 약간 늦은 경우에는 무부하 토크가 발생할 수 있어 감속영역에 도달할 수 있다.

그림 6에서와 같이 리액터의 설정 탭 적정 시간을 벗어나 절환하는 경우 기동시의 토크에 변화는 크게 없지만, 정격속도에서의 안정된 토크 확보가 어렵다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 직입 기동과 리액터 기동에 대해 탭의 설정값 변화에 따른 전력, 토크 및 전류의 변화를 비교 분석하였다.

리액터 탭의 설정값이 높을 경우 기동 초기에 전력 및 토크의 크기가 높고, 정격속도의 75%에서 절환시 전력 변화폭은 설정값이 낮은 경우에 비해 안정적임을 알 수 있었다. 또한 보편적으로 많이 적용하고 있는 65% 탭의 설정에서 부하 및 탭 절환시간의 변화가 너무 늦은 경우 최대 토크의 확보가 어렵고, 정격속도에 이르기 전에 무부하 토크가 발생하는 것을 알 수 있었다. 그리고 투입 및 절환 시간이 이른 시간일 경우 정격속도에 이르기 전에 높은 기동 전류 지속 시간이 높게 분포할 수 있다.

탭 설정에 의해 기동 운전할 경우 부하와 탭의 절환시간에 따라 정격 토크의 확보와 안정적인 운전에 차이가 존재

함을 확인할 수 있다.

본 연구결과는 향후 유도발전기의 리액터 기동시 동작특성 분석에 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Jong-Gyeum Kim et al., "Operation Characteristics of Induction Motor by Reactor Starting Type", KIEE EMECS Autumn Conference, pp.108-111, 2010. 08
- [2] Joseph Nevelsten and Humberto Aragon, "Starting of Large Motors- Methods and Economics", IEEE Trans on I.A, Vol.25, No.6, pp.1012-1018, Nov/Dec, 1989
- [3] Frank M. Bruce et al., "Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans on I.A, Vol.20, No.1, pp.46-55, Jan/Feb, 1984
- [4] Theodore Wildl, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002
- [5] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics Analysis for Reactor Starting Method of 3-Phase Induction Motor Considering Saturation", KIIEE, Vol.26, No.8, pp.65-70, 2012. 08
- [6] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual(EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원
Tel : 033) 760-8785
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr