

# 점호각을 고려한 유도전동기의 소프트 기동 특성 해석

## Analysis of Soft Start-up Characteristics of the Induction Motor Considering the Firing Angle

김 종 겸\* · 박 영 진\*  
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

**Abstract** - Induction motors are used widely in driving load of a fluid, such as a pump or a fan in the industry. Induction motor has been generated the voltage drop by the occurrence of a high current during startup. In addition, high start-up current can act as a mechanical stress on the shaft of the motor. So there is need a way to reduce the starting current. Soft start method is one of the many ways to reduce the starting current. This method uses silicon-controlled rectifiers(SCRs) for varying value of the voltage applied to the motor. There is a case for fixing or changing the thyristor firing angle to adjust the magnitude of the voltage. Starting power factor of induction motor is very low compared to the normal operation. Soft starting with the firing angle fixed needs to be considered a low power factor at startup. In this study, we compared the direct start characteristics and soft start characteristics considering the low power factor at the time of start-up. It was possible to confirm that the starting current and the voltage drop is present differently according to the firing angle.

**Key Words** : Direct starting, Induction motor, Starting current, Soft starting, Voltage drop

### 1. 서 론

산업현장에서 회전력을 얻기 위해 다양한 종류의 전동기가 사용되고 있다. 이들 중에서 유도전동기는 콤팩트, 견고성, 낮은 가격, 유지보수의 편리성 등 다양한 측면에서 우수하여 가장 널리 사용되고 있다[1-5]. 그러나 유도전동기는 직입 기동시에 정격전류의 5~8배 정도의 높은 기동전류가 발생하여 연결된 시스템의 전압강하를 초래할 수 있다[5-8]. 특히 최근에 제작되는 유도전동기의 경우 기존 것에 비해 회전자 권선의 저항이 낮으므로 기동시의 전류가 조금 높은 편이다[9]. 높은 기동전류로 인해 전압강하가 발생할 경우 전기적 동작이 문제가 될 수 있으므로 전압강하를 줄이는 것이 매우 중요하다. 유도전동기는 용량에 따라 직입 기동, Y- $\Delta$  기동, 리액터 기동, 소프트 기동 등을 이용하여 기동하고 있다[5,10]. 전전압으로 기동하는 직입 기동은 빠른 가속으로 회전력을 얻을 수 있지만, 기동 초기의 높은 토크에 의해 기기에 전기적 기계적 스트레스를 일으킬 수 있고, 높은 기동전류로 인해 전원측에도 상당한 전압강하를 초래할 수 있다. 그래서 부드러운 가속으로 기기에 스트레스를 줄이고 기동시의 전류를 낮출 수 있는 기동방법으로 최근에는 인버터나 소프트 기동에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 인버터를 사용할 경우 운전 중

에 지속적으로 전력변환장치에 의한 고조파가 문제가 될 수 있지만, 그러나 정속운전만이 필요한 곳에서 기동시 높은 기동전류를 저감시킬 필요가 있는 곳에서는 인버터에 의한 것보다는 가격 측면에서 유리한 소프트 기동방법을 많이 이용하고 있다.

유도전동기는 기동시에 전류가 매우 크지만, 역률은 상대적으로 낮으나, 속도가 증가함에 따라 기동시의 전류는 점차 감소하여 정격전류에 도달할 때까지 역률은 조금씩 증가하는 특성을 지니고 있다. 그러나 지금까지 소프트 기동에서는 기동시 역률의 변화가 이루어지는 것을 고려하지 않고 사이리스터 점호각만으로 전압의 크기를 조정하는 방식의 해석이 대부분이었다[6,8,10].

기동하는 순간과 기동에서 운전시까지 변하는 역률을 사이리스터의 점호각으로 사용하면 기동 전류의 저감과 전압강하를 줄일 수 있다. 그래서 소프트 기동에서 사이리스터의 점호각을 확실적으로 조정하기보다는 기동시의 동작 변화를 고려할 경우 제어가 쉬우면서 안정된 동작을 확보할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 전동기의 기동시 역률의 고려하여 점호각의 고정과 조정을 통해 높은 기동전류의 저감과 전압강하를 줄일 수 있는 소프트 기동방법에 대해 분석하였다.

### 2. 유도전동기와 소프트 기동

#### 2.1 유도전동기

그림 1은 유도전동기의 등가회로도이다. 그림 1에서  $R_1, R_2$ 는 각각 고정자와 회전자 저항,  $X_1, X_2$ 는 각각 고정자 및 회전자 임

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea  
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

Received : March 3, 2016 ; Accepted : May 10, 2016

피턴스,  $X_m$ 는 자화임피턴스이다. 회전자의 속도에 해당되는 슬립  $s$ 의 크기에 따라 고정자에 흐르는 전류는 회전속도에 따라 변화가 큰 편이다.

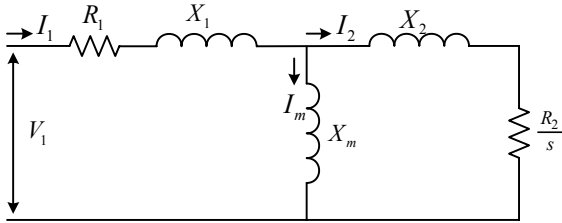


그림 1 유도전동기의 등가회로도  
Fig. 1 Equivalent circuit diagram of Induction motor

유도전동기의 운전에서 출력을 발생하는데 필요한 유효전력(P), 자화를 위해 필요한 무효전력(Q) 그리고 유효전력과 무효전력의 벡터합인 피상전력(S)과 이들의 관계를 나타내는 역률(pf)은 그림 1과 같은 등가회로도로부터 전압과 전류에 의해 식 (1)~(4)와 같이 구할 수 있다.

$$P = Re\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (1)$$

$$Q = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (2)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

$$pf = \frac{P}{S} \quad (4)$$

여기서 전압  $V_1$ 과 전류  $I_1$ 는 고정자에서의 값이다. 표 1은 본 연구에 사용된 3상 4극 75kW 유도전동기의 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1 유도전동기 파라미터  
Table 1 Induction motor parameters

parameters	Values
stator resistance, $R_1$	0.095[Ω]
rotor resistance, $R_2$	0.075[Ω]
stator leakage reactance, $X_1$	0.189[Ω]
rotor leakage reactance, $X_2$	0.151[Ω]
magnetizing reactance, $X_m$	6.032[Ω]

그림 2는 표 1에 제시된 값을 가지고서 그림 1에 적용하여 기동할 경우 유효전력과 무효전력의 비율(Q/P)을 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림 2에서 기동초기에는 유효전력 대 무효전력의 비가 2에 해당되지만, 4.5초의 시간이 지나 정격속도에 가까울 때는 0.51 정도로 점차 크기가 점차 감소함을 볼 수 있다. 유효전

력 대 무효전력의 비율이 높다는 것은 역률이 낮은 것을 의미하고, 점화각이 크다는 것이다. 역률이 거의 1이 될 경우 점화각도 거의 0°이고, 유효전력 대 무효전력의 비율은 0에 가깝게 될 때이다. 기동에서 정격속도로 운전할 때까지 유효전력 및 무효전력의 변화는 식 (1)~(4)에서와 같이 역률이 변화한다는 것이다.

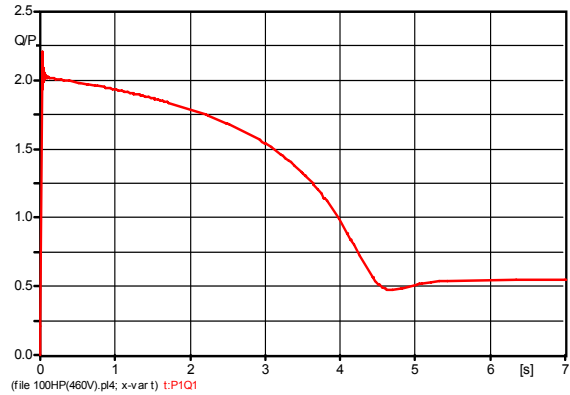


그림 2 무효전력 대 유효전력의 비  
Fig. 2 The ratio of active power vs. reactive power

그림 3은 본 연구에서 제시한 유도전동기가 기동에서 정상 운전까지 운전할 경우 역률(PF:○)과 전압과 전류에 대한 점화각(Angle:□) 변화를 나타낸 것이다.



그림 3 역률과 점화각  
Fig. 3 Power factor and firing angle

그림 3에서와 같이 기동초기에 역률은 0.44로 시작하여 정격 속도에 도달한 이후에는 0.88로 증가하였다. 이때 점화각은 역률의 변화에 따라 기동초기에는 63.9°에서 정격속도로 회전할 때는 28.35°로 변화하였다.

그림 2와 그림 3에서와 같이 기동에서 정격속도에 도달할 때까지 전력의 변화로 역률과 점화각에 차이가 존재하기 때문에 유도전동기의 기동시 발생하는 높은 기동전류의 의한 전압강하를 줄이기 위해서는 소프트 기동에서 사이리스터의 점화각 조절에

이와 같은 점호각의 변화를 반영할 수 있다.

### 2.2 소프트 기동

유도전동기는 기동시 무효전력이 유효전력에 비해 매우 높기 때문에 역률이 낮은 편이다. 따라서 기동 전류 저감을 위한 소프트 스타터 기동장치에서 사이리스터의 점호각을 고정하여 운전할 경우 기동초기의 낮은 역률을 고려하여 설정해야 한다.

소프트 기동은 그림 4와 같이 사이리스터, 트라이악, IGBT와 같은 전력 반도체 소자를 3상회로의 각 상에 병렬로 설치하여 점호각 고정이나 조정으로 유도전동기에 공급하는 전압의 크기를 조절하여 토크나 전류를 조절할 수 있다.

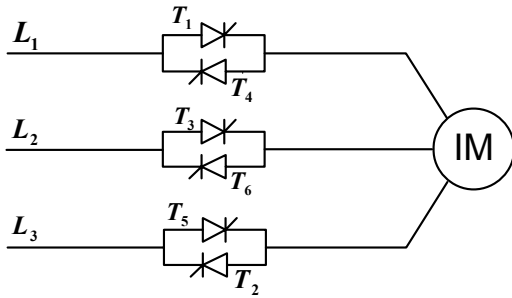
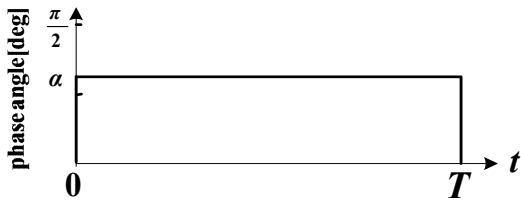
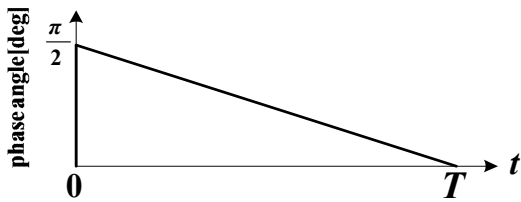


그림 4 소프트 스타터의 개념도

Fig. 4 Schematic diagram of soft starter



(a) 점호각 고정



(b) 점호각 가변

그림 5 게이팅 점호 패턴

Fig. 5 Gating firing pattern

그림 5는 그림 4와 같이 사이리스터의 게이팅 신호에 대한 점호각의 고정과 조정에 대한 패턴을 나타낸 것으로서 전동기의 입력전압 제어를 위해 그림 5(a)와 같이 기동하여 정격운전속도에

도달할 때( $T$ )까지 사이리스터의 게이팅 신호 점호각을 고정한 경우와 그림 5(b)와 같이 점호각을 기동초기에서 정격속도에 도달할 때까지 점차 줄여나가는 방법이 있다. 게이팅의 점호각을 고정하는 경우 기동시의 역률을 입력으로 사용하면 된다. 기동시의 역률은 정격속도로 운전시보다 매우 낮으므로 이 값을 점호각으로 변환하여 그림 4의 각 상별에 병렬로 설치된 사이리스터에 사용한다. 점호각 가변에서는 전압의 위상을  $\pi \sim 0[rad]$ 까지 조정이 가능하지만,  $\pi[rad]$ 의 범위까지 고려할 경우 기동초기 전류는 줄일 수 있으나 전력의 공급이 낮아 부하의 운전이 어려움이 있을 수 있다. 그래서 본 연구에서는 점호각을 그림 3에서와 같이 기동초기에서의 역률에 의해 구해진 점호각에서 시작하여 정격속도에 도달할 때까지의 역률이 변화되는 것을 그림 4의 사이리스터 점호각에 적용시키는 방법을 사용하였다.

### 3. 해석 및 결과 분석

펌프와 같은 원심부하는 회전속도의 상승에 따라 부하토크가 증가하기 때문에 직입기동 보다는 리액터 기동이나 소프트 기동을 적용하는 것이 높은 기동전류에 의해 발생하는 전압강하에 의한 문제를 줄이는데 효과적이다. 그래서 본 연구에서는 직입 기동에 의한 것과 소프트 기동에서 점호각의 고정 및 가변에 대한 것을 비교 분석을 실시하였다. 유도전동기의 기동시 발생하는 과도현상 분석에는 전자계 과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하였다 [11].

#### 3.1 직입기동

직입기동(DOL : Direct on line starting)은 부하를 가장 빠른 시간에 정격속도로 운전시킬 수 있는 방법이다. 그러나 기동시 발생하는 높은 기동전류는 전압강하 및 큰 토크는 기계적인 스트레스로 작용할 수 있다. 그래서 출력이 낮은 용량의 부하 운전이 많이 적용하고 있다.

그림 6은 본 해석에 적용된 3상 4극 75kW 유도전동기(A3)와

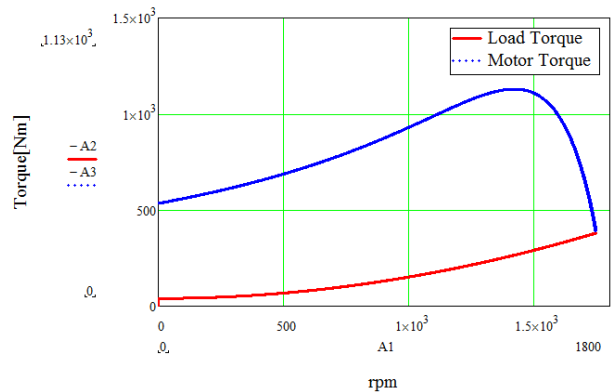


그림 6 전동기 토크와 부하 토크

Fig. 6 Motor torque and load torque

펌프부하(A2)의 토크 곡선을 나타낸 것이다. 전원 투입 후 회전속도가 증가하여 부하 토크와 전동기 토크가 만나는 점에서 정격속도로 운전하게 된다.

그림 6과 같은 펌프 부하의 운전시 발생하는 기동전류와 전압의 크기 변화는 그림 7과 같다. 기동 순간에 발생하는 기동전류(A2)는 정격속도로 운전하는 전류의 6.16배가 되었다. 이와 같은 높은 기동전류가 흐를 때 기동초기에 전압(A3)은 일시적으로 떨어지는데 이때 발생한 전압강하는 2.3%가 되었다. 직입 기동시 높은 전류는 토크를 증가시켜 축에 기계적인 스트레스로 작용할 뿐만 아니라 전력을 순간적으로 높게 필요로 하므로 가능한 줄일 필요가 있다.

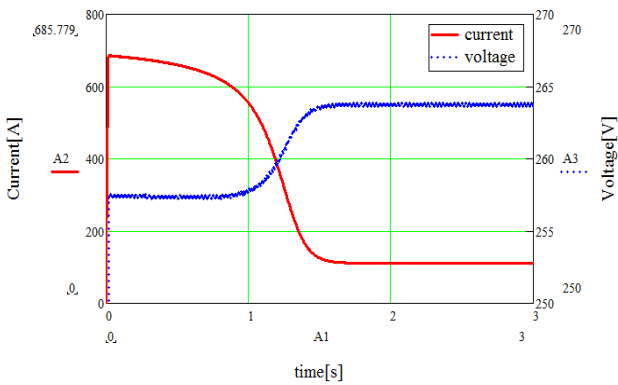


그림 7 기동전류와 전압강하  
Fig. 7 Starting currents and voltage drop

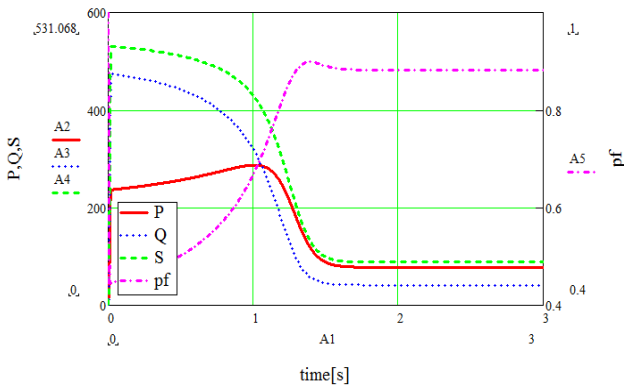


그림 8 직입 기동의 전력 및 역률  
Fig. 8 Power and power factor at DOL starting

그림 8은 직입 기동할 때 기동에서 정격속도에 도달할 때 까지 유효전력(A2), 무효전력(A3), 피상전력(A4) 및 역률(A5)의 변화를 나타낸 것이다. 기동초기에 무효전력이 유효전력보다 크기 때문에 초기의 역률은 정격속도로 운전할 때보다 낮다. 정격속도에 도달한 다음에는 무효전력이 유효전력보다 낮아 역률은 기동 초기에 비해 높아진다. 이와 같이 기동초기의 낮은 역률은 소프

트 기동에서 사이리스터의 점호각 조정의 자료로 활용할 수 있다. 정격운전시의 역률은 0.88이지만, 기동 초기의 역률은 정격운전시의 절반에 해당되는 0.44가 되었다. 여기서 기동시 낮은 역률을 소프트 기동시 사이리스터의 입력 점호각으로 점호각으로 변환하여 사용할 수 있다.

### 3.2 소프트 기동

유도전동기 기동에 소프트 기동방법을 적용할 경우 기동전류를 줄여 회로에서 전압강하를 피할 수 있다. 이는 또한 기동 토크와 기기에 기계적인 스트레스도 줄일 수 있으므로 유지보수측면에서도 유리하다. 소프트 기동은 기동시나 운전시 주파수의 변화가 없이 단지 전동기에 인가되는 전압을 처음에는 정격보다 작은 값으로 설정하고서 정격속도에 도달할 때까지 상승시키는 것으로서 이때 전류도 함께 줄이는 것이다.

소프트 기동은 인버터와 같은 가변속 제어장치와는 달리 전동기에 인가되는 주파수나 전압을 모두 바꾸는 것이 아니고, 주파수는 고정하고서 전압의 크기만을 바꾸는 것이다. 즉, 소프트 기동은 전압에서 미리 설정된 초기 값에서 선형으로 전동기에 인가되는 단자 전압을 상승시키는 것으로서 기동 초기에 전압을 줄여서 전동기 토크를 낮추어 가속을 부드럽게 하도록 한 것이다.

그림 9는 직입 기동(A2) 및 점호각 고정(B2)과 점호각 가변(C2)에 따른 소프트 기동시 전류의 크기를 나타낸 것이다. 직입 기동한 경우가 가장 높은 전류가 발생하나 빠르게 정격속도에 도달하고, 점호각 고정한 경우 직입 기동에 비해 조금 낮은 전류로 시작하지만, 정격속도에 도달하고 난 이후에는 직입기동과 점호각 가변에 비해 높은 전류가 지속적으로 전동기에 인가되고 있다. 이는 사이리스터에 부착한 바이패스 스위치를 동작시킬 경우 직입기동과 같은 정격전류로 운전이 가능하다.

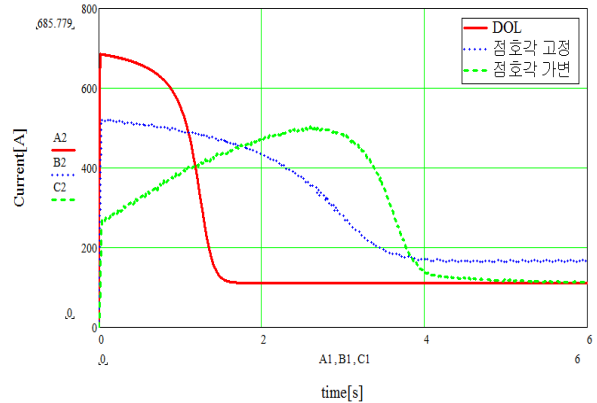


그림 9 전류의 비교  
Fig. 9 Current comparison

그림 9에서 정격속도에서의 전류는 3가지 기동방법 모두 같지만, 기동초기의 전류는 직입기동이 가장 높고, 점호각 고정한 경우가 그 다음으로 높으며, 점호각을 조정할 경우에 기동 초기의

전류는 가장 낮게 나타났다. 기동초기에 전류는 전력에 비례하기 때문에 전원측으로부터 유효 및 무효전력이 정격속도로 운전할 때보다 높게 요구하게 된다. 그림 9에서 알 수 있듯이 소프트 기동방법을 적용하는 경우 기동 전류 감소가 가능하기 때문에 직입 기동에 비해 낮은 정격의 차단기를 적용할 수 있다.

그림 10은 직입 기동 및 소프트 기동시의 토크를 회전속도에 따라 비교한 것이다. 3가지 모두 정격속도에서 토크는 일정하지만, 기동 초기에는 직입 기동(A2)이 가장 높고, 다음으로 점호각 고정(B2)이며, 점호각 조정(C2)이 기동초기에 가장 낮지만, 속도가 상승하여 최대토크가 발생할 경우에는 점호각 조정이 점호각 고정보다는 조금 높은 토크가 발생하는 것을 알 수 있다. 최대 토크는 직입 기동이 소프트 기동보다 높게 나타났다.

유도전동기가 기동할 경우 전원측과 전동기 단자에서의 전압 변화를 그림 11에 나타내었다. 우선 전동기가 연결된 전원측의 전압의 변동은 그림 11에서와 같이 기동 초기 직입 기동(A2)한 경우가 소프트 기동(B2, C2)보다 전압강하가 크고, 같은 기동 초기에서도 점호각을 고정한 경우(B2)가 점호각을 조정(C2)한 경우보다 전압강하가 크며, 점호각을 고정한 경우 회전속도가 증가함에 따라 전압강하는 점차 감소하지만, 점호각 가변은 기동 초기에서 속도가 약간 상승할 경우 전압강하는 초기보다 높으나 정격 속도에 도달하는 시점부터는 감소하는 것을 알 수 있다.

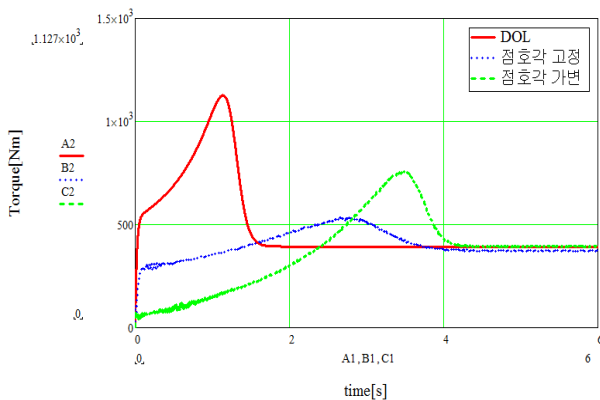


그림 10 토크의 비교  
Fig. 10 Torque comparison

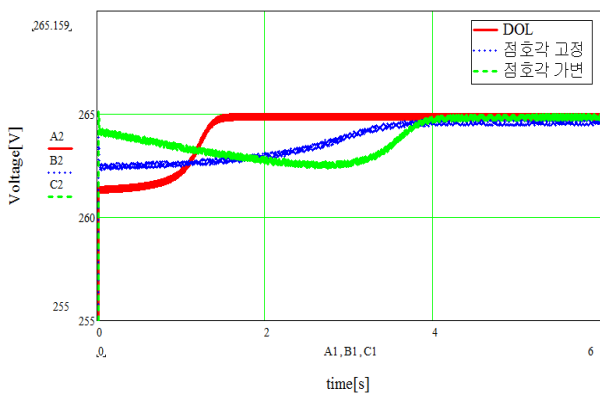


그림 11 전원측의 전압 비교  
Fig. 11 Voltage comparison of source side

에 따라 전압강하는 점차 감소하지만, 점호각 가변은 기동 초기에서 속도가 약간 상승할 경우 전압강하는 초기보다 높으나 정격 속도에 도달하는 시점부터는 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 12는 전동기에 인가되는 전압의 크기를 나타낸 것이다. 직입기동의 경우 소프트 기동에 비해 전압강하는 낮고, 가장 빠르게 정격전압으로 회복한다. 그러나 소프트 기동에서 점호각을 조정(C2)한 경우가 점호각을 고정(B2)한 경우보다 기동 초기에는 전압은 낮으나 속도가 점차 상승함을 알 수 있다. 이는 점호각을 고정한 경우 회전속도의 변화에도 전압의 변화가 없는 반면, 점호각을 고정한 경우 회전속도가 증가함에 따라 전압이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 점호각을 고정하여 운전한 경우 전압이 낮으므로 전동기에 흐르는 전류는 두 가지 방법에 비해 높아진다. 한편으로 사이리스터에 부착된 바이패스 스위치를 정격속도 근처에서 온 시킬 경우 전류는 직입과 같은 크기로 순간적으로 흐르게 할 수 있다.

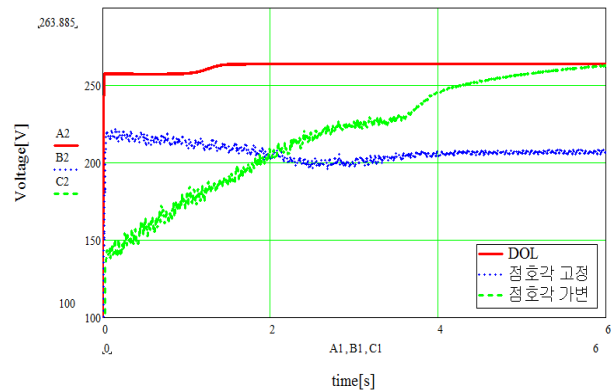


그림 12 전동기 단자의 전압 비교  
Fig. 12 Voltage comparison of motor terminal

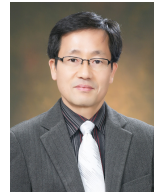
#### 4. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 펌프와 같은 설비를 유도전동기로 직입 기동할 때 발생하는 높은 기동전류에 의해 발생하는 토크와 전압강하에 의한 문제점을 개선하기 위한 소프트 기동방법 중에서 사이리스터의 점호각의 고정과 가변에 의해 기동전류와 전압강하를 줄이는 방법에 대해 해석하였다. 해석 결과 속응성을 요구하지 않는 유체부하에 직입기동에 의한 것보다 소프트 기동에 의한 경우 기동전류의 저감으로 전압강하는 물론이고 큰 기동 토크에 의한 기계적인 스트레스를 저감할 수 있다는 것을 확인하였다. 소프트 기동에서도 점호각의 고정과 점호각의 가변에서 기초 초기에 전류와 전압강하의 크기에 차이가 있고, 전압강하의 지속시간에도 서로 차이가 존재함도 확인하였다. 또한 소프트 기동에서 점호각을 고정한 경우보다 기동에서 정격속도까지 변화하는 역률의 변동을 고려한 점호각 가변에 의한 소프트 기동이 유도전동기의 기동에 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics for Current and Power of Induction Motor by Load Variation", KIIEE, Vol. 25, No. 8, pp.82-87, 2011. 06
- [2] Jong-Gyeum Kim and Young-Jeen Park, "A Characteristic Study on the Power Factor Application for Induction Motor", KIIEE, Vol. 22, No. 9, pp. 25-31, 2008. 09
- [3] Theodore WildI, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002
- [4] Jong-Gyeum Kim, "Comparison Analysis of Induction Motor using the Equivalent Circuit", KIEE, Vol. 63P, No. 1, pp. 7-11, 2014. 03
- [5] Minho Park, Induction Machines, Dongmyungsa, pp.315, 1990
- [6] Frank M. Bruce et al., "Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans on IA, Vol.20, No.1, pp.46-55, Jan/Feb, 1984
- [7] Jong-Gyeum Kim, "Analysis for the Inrush Current and Voltage Drop of Induction Generator by the Reactor Tap Change", KIEE, Vol. 64, No. 8, pp. 1202-1206, 2015. 08
- [8] Gurkan Zenginobuz, et al., "Performance Optimization of Induction Motors During Voltage Controlled Soft Starting", IEEE Trans on EC, Vol. 19, pp. 278-288, 2004, Jun
- [9] Jong-Gyeum Kim, "Characteristic Comparison Analysis for Standard and High-Efficiency Induction Motor", KIEE, Vol. 56P, No. 4, pp.186-190, 2007. 12
- [10] Gurkan Zenginobuz, Isik Cardici, Muammer Ermis, Cuneyt Barlak, "Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current With Minimized Starting Torque Pulsations", IEEE Trans on IA, Vol. 37, No. 5, Sep/Oct 2001.
- [11] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

## 저 자 소 개

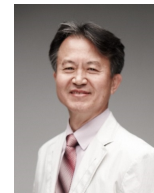


### 김 종 겐 (Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수, 현재 당학회 평의원 및 B부문회 전기기기연구회 위원장

Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



### 박 영 진 (Young-Jeen Park)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

Tel : 033) 760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr