

비동기 전동기 기동시 스위칭시간 계산에 관한 시뮬레이션

배철오[†] · 브엉득푹¹

(원고접수일 : 2012년 5월 10일, 원고수정일 : 2012년 6월 12일, 심사완료일 : 2012년 8월 29일)

Simulation for the Calculation of Switching Time when Asynchronous Motors are Starting

Cherl-O Bae[†] · Duc-Phuc Vuong¹

요약 : 비동기 전동기는 여러 분야에서 널리 사용되고 있으며, 특히 전원공급에 비해 많은 전력을 사용하는 전동기의 경우 이를 기동하기 위해서는 다양한 기동방법이 적용되고 있다. 전동기 기동방법은 주로 회전자에 가변저항을 삽입하거나 고정자에 공급하는 전압을 감소시키는 방법이 사용되고 있다. 이와 같이 기동시 가변저항을 변경하거나 전압을 변경하기 위해서는 특정 단계에서 특정한 시간이 필요하게 된다. 이 시간을 스위칭시간이라 부르며, 이 시간을 정확히 파악하는 것은 매우 어려운 부분이다. 이 시간은 전동기의 부하특성이나 그 형식에 따라 변화한다. 따라서 본 논문에서는 전동기와 부하의 수학적 모델의 개발과 설계에 대해서 알아보고, 전동기의 기동에 필요한 스위칭시간을 계산하기 위해 SIMULINK를 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 다양한 전동기와 부하를 가진 시스템에 가장 적절하고 적용 가능한 기동 시간을 얻는데 활용할 수 있도록 비교 검토되었다.

주제어 : 비동기 전동기, 스위칭시간, 기동방법, SIMULINK

Abstract: Asynchronous motors are widely used in many fields. The various starting methods have been developed for the asynchronous motors which have large power compared to source power. The most popular ways to start the motors are to reduce the voltage of motor's stator or change the resistance fed rotor. It is needed to the specific time to reduce the voltage and change the resistance at a specific step. We call it the switching time. It is very difficult to know the switching time exactly. It varies with different types of motors as well as load characteristics. Thus, this paper focuses on the design and development for the mathematical models of motor and load. And then it is implemented in SIMULINK in order to calculate this time. The simulation results are both compared and discussed in detail so that it can be applied for new system with various motors and loads.

Key words: Asynchronous motor, Switching time, Starting method, SIMULINK

1. 서 론

농형 유도전동기 기동에는 크게 직입 기동, 주파수 변환기를 이용하는 기동, star-delta 등이 있으며 그밖에 1차 저항, 1차 리액턴스, 오토 트랜스포머 기동 및 전력반도체를 사용하는 소프트스타터 기동방법 등 여러 방법이 있다[1-4]. 각각의 기동방법

에는 장·단점이 있지만 가장 간단하고 경제적으로 사용하는 방법으로 star-delta 기동이 많이 사용되고 있다. 전동기 기동에 있어서 기동시 일정 시간 후 전압을 변경하기 위해서는 적절한 시간 즉 스위칭시간이 필요하게 된다. 권선형 유도전동기의 경우 회전자회로에 가변 저항을 삽입하여 기동하

[†] 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: baeco@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7223)

¹ 목포해양대학교 기관시스템공학부 대학원 박사과정, E-mail: phucdt@gmail.com, Tel: 061-240-7232

는 방법이 주로 사용되는데, 이 경우에도 가변 저항값의 변경을 위해서는 일정시간의 스위칭시간이 필요하게 된다.

전동기의 기동을 위해 가능한 한 짧은 시간의 스위칭시간이 필요하게 되며, 적절하게 스위칭 시간을 조정하지 않으면 전동기의 샤프트에 직결된 커플링과 발전기에 불필요한 높은 응력을 발생시키며 다른 시스템과의 연계시 안전에도 영향을 주게 된다.

비동기 전동기는 주로 계통으로부터 3상의 전력을 받아 기동기를 경유하여 시동된다. 이론적으로는 비동기 전동기의 기동기는 미분형태로 된 전압 방정식, 운동 방정식과 자속방정식의 알고리즘이 사용된다[5,6].

2. 전동기의 방정식과 모델링

2.1 전동기의 방정식

전동기의 방정식은 주로 (d, q)축을 기준좌표계로 하여 작성하게 되는데, 이는 몇몇 변수들이 생략되어 시뮬레이션을 하기 쉽게 때문이다.

변경된 전동기의 방정식을 ‘*’로 표시하여 나타내면:

$$u_d^* = r \cdot i_d^* + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_d^*}{dt} - \omega_s \cdot \Psi_q^* \tag{1}$$

$$u_q^* = r \cdot i_q^* + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_q^*}{dt} + \omega_s \cdot \Psi_d^* \tag{2}$$

$$0 = \frac{d\Psi_D^*}{dt} + \frac{i_D^*}{T_r} - s \cdot \omega_s \cdot \Psi_Q^* \tag{3}$$

$$0 = \frac{d\Psi_Q^*}{dt} + \frac{i_Q^*}{T_r} + s \cdot \omega_s \cdot \Psi_D^* \tag{4}$$

$$\Psi_d^* = X^* \cdot i_d^* + i_D^* \tag{5}$$

$$\Psi_q^* = X^* \cdot i_q^* + i_Q^* \tag{6}$$

$$\Psi_D^* = \mu \cdot X^* \cdot i_d^* + i_D^* \tag{7}$$

$$\Psi_Q^* = \mu \cdot X^* \cdot i_q^* + i_Q^* \tag{8}$$

$$M_c^* = \Psi_d^* \cdot i_q^* - \Psi_q^* \cdot i_d^* \tag{9}$$

$$M_e^* - M_c^* = T_M \frac{d\omega_r}{dt} \tag{10}$$

여기서:

u^*, i^*, r, Ψ^* : 순시전압, 전류, 저항 및 쇄교자속

X : 회전자 리액턴스

ω_b : 각속도(rad/s)

i_d^*, i_q^* : 각 d, q, 축에 흐르는 고정자 전류

i_D^*, i_Q^* : 각 d, q 축에 흐르는 회전자 전류

μ : 고정자와 회전자 회로의 상관계수

M_e^* : 전자기 토크

M_c^* : 부하 토크

T_M : 기계적 시정수

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{11}$$

s : 슬립

ω_s : 동기속도

ω_r : 회전자속도

$$T_r = \frac{L_D}{r_D} = \frac{L_Q}{r_Q} \tag{12}$$

T_r : 회전자 회로의 시정수

L_D, L_Q : d, q축 회전자 권선의 자기 인덕턴스

r_D, r_Q : d, q축 회전자 권선의 저항

윗 식의 (1)과 (2)는 고정자 권선과 관련된 전압 방정식을 나타내고, 만일 고정자 권선에 가하는 공급전압을 감소시켜 기동시키면 u_d^*, u_q^* 는 변함을 알 수 있다. 식 (3)과 (4)는 회전자 권선과 관련된 전압방정식을 나타내며, 권선형 유도전동기의 경우 식(12)에서와 같이 회전자 권선의 저항과 인덕턴스의 값이 달라지기 때문에 시정수 T_r 은 다른 값을 가진다. 식 (5)~(8)까지의 4개의 식은 회전자 권선과 고정자 권선과 관련된 자속방정식을 나타낸다. 식 (10)은 운동방정식을 나타내며, 식 (9)를 통하여 계산된 전자기 모멘트를 토대로 회전자의 회전속

도를 구할 수 있다. 부하에는 여러 가지 종류가 있으나 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 부하로는 크레인, 앵커, 윈드라스와 같이 토크 값이 일정한 부하이므로 두 번째로는 속도의 제곱에 비례하는 부하토크로 원심펌프와 같이 정격속도로 회전할 경우 부하토크 M_c 가 최대가 되는 부하이다.

부하토크는 다음과 같이 부하가 일정할 경우와 속도에 따라 변하는 2가지로 표시할 수 있다.

$$M_c = const \text{ or } M_c = k \cdot \omega_s^2 \quad (13)$$

여기서 $k = \frac{\text{부하토크}}{\text{전동기의 정격 토크}}$ 로서 그 값을 %로 나타낸다.

2.2 시스템 모델링

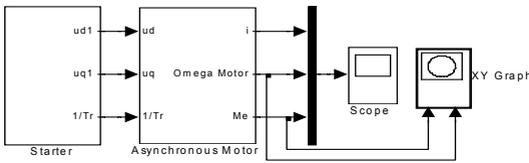


Figure 1: Modeling of system

Simulink(Matlab)[7-9] 시뮬레이션 툴을 이용하여 Figure 1과 같이 위에서 유도된 식 (1)부터 (13)까지를 프로그래밍하여 모델링하였다. 기동기를 통하여 비동기 전동기에 전원이 공급되며, 이후 전동기의 회전자 속도와 고정자권선의 전류를 스코프로 측정하였다.

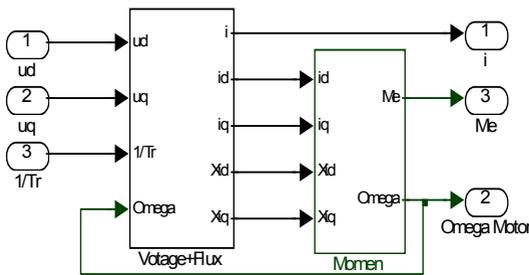


Figure 2: Modeling of asynchronous motor

비동기 전동기의 경우 모델링 하는데 있어서 복

잡하기 때문에 Figure 2와 같이 2개의 시스템으로 분리해 볼 수 있다.

Figure 2의 좌측 사각형의 "Voltage+Flux"는 식 (1)~(8)을 이용하여 모델링하였고, 우측 사각형의 "Momen"은 식 (9), (10)과 (13)으로부터 모델링된 그림을 나타낸다. Figure 2에서 나타낸 "Voltage+Flux"의 식 (1)~(8)과 관련된 부분은 Figure 3과 같이 구현된다.

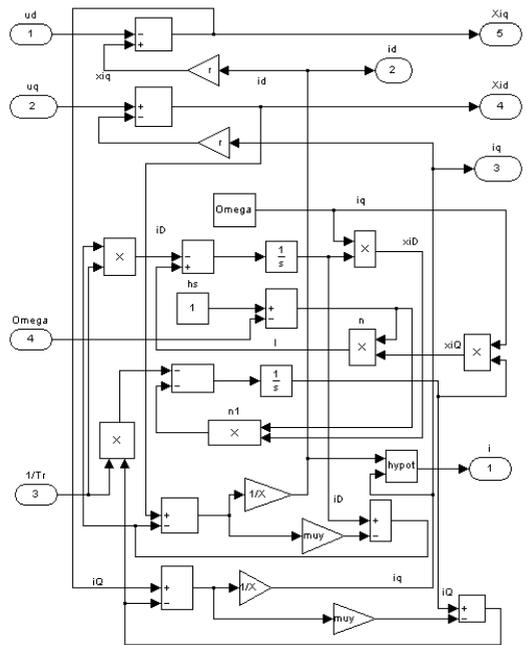


Figure 3: Modeling of voltage and flux equations

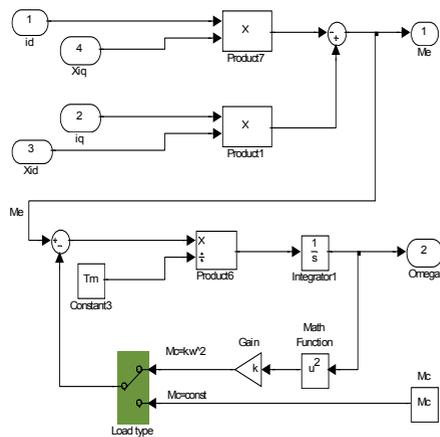


Figure 4: Modeling of load torque types

Figure 2의 "Momen"부분의 내부 서브시스템은 Figure 4와 같이 구현되며, Figure 4에서는 2가지 부하 종류인 $M_c = const$ 와 $M_c = k \cdot \omega_s^2$ 를 선택할 수 있게 된다.

3. 기동 알고리즘

본 논문에서는 1대의 권선형 유도전동기를 대상 모델로 하여 시뮬레이션을 실시하였다. 다만 이 후 언급된 각각의 농형과 권선형 유도전동기는 독립된 2대의 전동기가 아니라 모델로 선정된 권선형 유도전동기의 회전자 권선을 단락하여 농형 유도전동기 형태로 기동 시뮬레이션을 실시하였고, 다른 하나는 브러쉬를 통해 외부 저항을 삽입한 형태의 기동 시뮬레이션을 실시하였다.

3.1 Star-delta 기동

비동기 전동기는 전력망으로부터 공급된 전원으로 로 기동되기 때문에, 전압은 정격전압과 같으므로

$$u^* = \sqrt{u_d^* + u_q^*} = 1 \tag{15}$$

$u_q^* = 0$ 으로 표시하면 편리하므로 알고리즘은 아래 식과 같다.

$$\text{만일 } t < t_Y \text{ 이면 } u_d^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ 이거나 } u_d^* = 1 \tag{16}$$

t_Y : 계산에 필요한 스위칭시간

3.2 2차 저항 기동

식 (12)에서 회전자의 저항 R_V 가 변하면, 회전자 회로의 시정수 T_r 도 함께 변하게 되고 따라서 그 결과식은 아래와 같이 된다.

$$T_r = \frac{L_D}{r_D + R_V} = \frac{L_Q}{r_Q + R_V} \tag{17}$$

(R_V : 가해진 회전자 저항)

기동을 위해 필요한 3개의 저항값(R_1, R_2, R_3)을 얻기 위한 알고리즘은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\text{if } 0 \leq t < t_1 \text{ then } R_V = R_3 = R_{Max} \tag{18}$$

$$\text{if } t_1 \leq t < t_2 \text{ then } R_V = R_2 < R_{Max}$$

$$\text{else } R_V = R_1 = 0$$

t_1, t_2 는 계산에 필요한 스위칭시간을 나타낸다.

3.3 기동기의 모델링

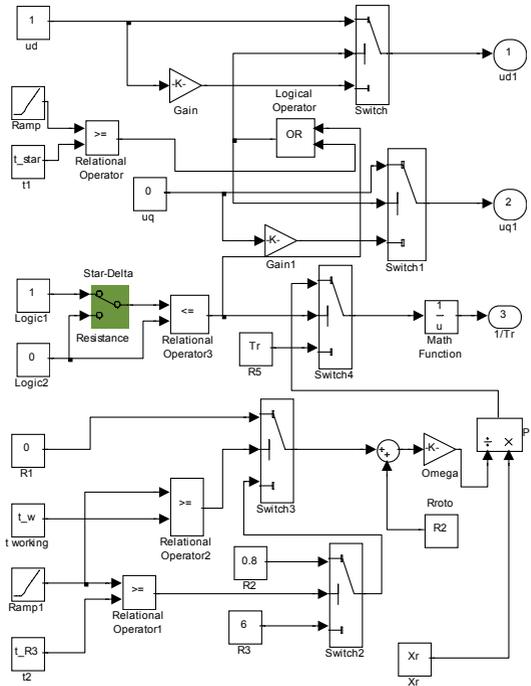


Figure 5: Subsystem modeling of Starter

Figure 5는 star-delta 및 2차 저항 기동을 위해 식 (16), (17) 및 (18)로부터 모델링을 한 그림을 나타낸다. 그림의 음영 처리된 부분을 조정하여 star-delta 및 2차 저항 기동의 기동방법을 변경할 수 있다. 기동방법 전환 스위치를 star-delta 위치로 놓으면 Relational Operator3에 의해 “0” 논리가 출력되고, 이때 Switch4의 출력은 R5와 같게 된다. 또한 Switch와 Switch1의 입력은 단지 스위칭 시간 t_1 에 좌우되며, 이때 식 (16)이 수행된다. 한편 전환 스위치를 Resistance 위치로 놓으면, 식 (18)이 수행되며 Switch와 Switch1이 “1” 논리를 출력하며

로 $ud=1$ 과 $uq1=0$ 이 된다. Relational Operator3의 출력은 "1" 논리이므로 Switch4의 출력은 스위칭 시간 $t2(t_R3)$ 와 $t-w(tworking)$ 에 의해 좌우된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 시스템의 파라미터

Figure 6은 시뮬레이션에 사용된 여러 변수를 나타낸 그림으로 정격전압, 정격전류, 부하토크 및 회전자 저항등과 같은 전동기와 관련된 여러 값들을 포함하고 있다.

```

E:\VTL Phucsystem_parameter.m
File Edit Text Window Help
Parameters of Motor
1 clear;
2 Pn=11000;% Rated Power
3 Un=440;% Reated Voltage
4 cosPhi=0.75;
5 In=Pn/Un*cosPhi;%Rated Current
6 Rs=0.57;%Resistance Stator
7 Xs=18.23;
8 Xm=17.7;
9 R2=0.239;
10 X2=1.337;
11 rpm=730;% Rated speed in rpm
12 f=50;%Frequency
13 Ub=Un*sqrt(2)/sqrt(3);% Rated phase voltage
14 Ib=In*sqrt(2);% Rated phase cuurent
15 Zb=Ub/Ib;
16 Omega=2*pi*f;
17 r=Rs/Zb;%Resistance in relative value
18 X=Xs/Zb;%Inductance in relative value
19 Xr=X2+Xm;
20 Tr=Xr/(Omega*R2);
21 muy=Xm^2/(Xr*Xs);
22 Tm=1.5;
23 k=0.9;%Load value k*omega^2
24 Mc=0.5;%Load value const
25 t_star=10%trasfer time from star-delta
26 t_R3=6%trasfer time from R3-R2
27 t_w =4%trasfer time from R2-tw(t working)
    
```

Figure 6: Parameters of system

4.2 star-delta 기동

4.2.1 전동기 부하가 일정할 경우

Figure 4에서 "load type"의 위치를 $M_c = const$ 로 설정하고, Figure 5에서 star-delta 위치로 조절한다. 우선 농형 유도전동기의 정격모멘트의 15%로 기동하면 Figure 7과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

Figure 7에서 알 수 있듯이 고정자 전류는 기동 후 약 7초 후에 안정됨을 볼 수 있으며, 전류가 안정될 때까지 걸리는 약 7초가 스위칭시간을 나타내며, 따라서 7초 후에 star에서 delta 결선으로 변경하면 된다.

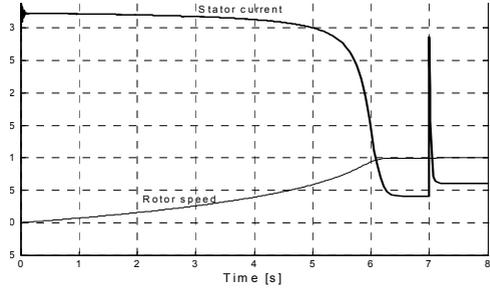


Figure 7: Curves at $M_c = 15\%$ starting

또한 정격모멘트를 20%와 30%로 부하토크를 각각 증가시키면 Figure 8과 Figure 9의 그래프를 얻을 수 있다.

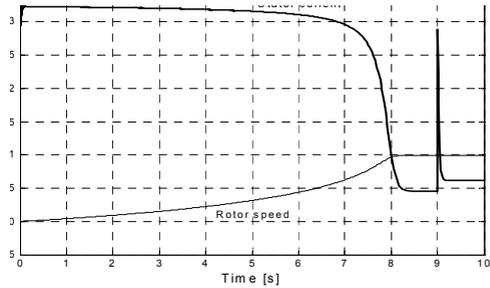


Figure 8: Curves at $M_c = 20\%$ starting

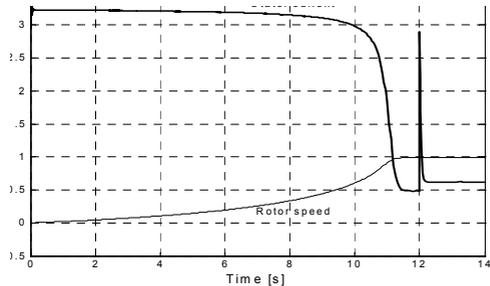


Figure 9: Curves at $M_c = 25\%$ starting

Figure 8과 같이 전동기를 정격모멘트의 20%로 기동하면 스위칭시간은 9초가 되고, Figure 9와 같이 25%로 증가시키면 스위칭시간은 12초로 늘어난다.

따라서 스위칭 시간은 전동기가 높은 부하토크로 기동될 때 더 길다는 것을 알 수 있다. Table 1

은 부하 토크와 스위칭시간과의 관계를 나타낸다.

Table 1: The relationship between switching time and load torque values

Load torque values	Switching time [sec]
10%	5
12%	5.5
15%	7
20%	9
25%	12

보통의 농형 유도전동기는 높은 부하토크로 기동할 수 없으며, 주로 정격모멘트의 30% 이내로 기동하도록 하고 있다. 만일 더 높은 부하토크로 운전 시에는 다른 구조의 전동기를 이용하거나 특별한 기동장치를 가진 농형 유도 전동기를 사용해야 할 것이다.

4.2.2 전동기 부하가 속도에 따라 변할 경우

Figure 4에서 "load type"의 위치를 $M_c = k \cdot \omega^2$ 로 설정하고, **Figure 5**에서 star-delta 위치로 조절한다.

여기서 얻어진 시뮬레이션 결과 그래프도 앞서 언급한 **Figure 7, 8, 9**와 같은 유사한 그래프를 얻을 수 있으며, 이 부하토크로 운전시 소요되는 스위칭시간을 **Table 2**에 나타낸다. 이 부하토크에서는 일정부하의 경우보다 짧은 시간에 쉽게 기동되는 것을 알 수 있으며, 정격속도로 부하토크를 100%로 증가시킬 때, 스위칭시간은 8초 정도 걸리는 것을 알 수 있다.

Table 2: The relationship between switching time and load torque values

Load torque values	Switching time [sec]
30% ω^2	4.5
40% ω^2	4.5
50% ω^2	4.8
60% ω^2	5.2
70% ω^2	5.6
80% ω^2	6.2
90% ω^2	7
100% ω^2	8

4.3 2차 저항 기동

4.3.1 전동기 부하가 일정할 경우

Figure 4에서 "load type"의 위치를 $M_c = const$ 로 설정하고, **Figure 5**에서 resistance 위치로 조절한다.

Figure 10은 권선형 유도전동기를 정격모멘트의 30%로 기동했을 때의 그래프를 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이 스위칭 시간은 더 짧아졌음을 알 수 있다. 최대 저항값으로 기동한 이후 기동전류가 안정되기까지는 단 2초밖에 걸리지 않았으며, 다음 저항의 변경단계에서는 0.5초 정도 소요되었다. 따라서 기동후 2초 후에 다음의 낮은 저항으로 스위칭을 하고, 이후 0.5초 후에 최소 저항으로 스위칭을 하여 정격운전을 하면 된다. **Figure 10**의 경우는 충분한 스위칭시간을 위해 첫 번째 단계에서 3초, 두 번째 단계에서 1초 후에 스위칭을 한 결과의 그래프를 나타내고 있다.

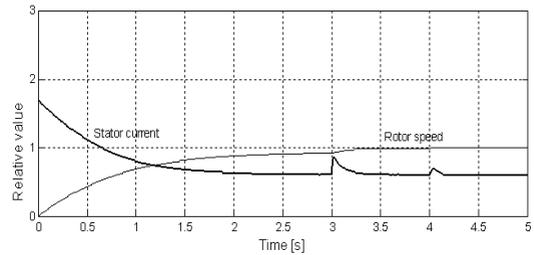


Figure 10: Curves at $M_c = 30\%$ starting

부하토크에 따른 스위칭시간의 시뮬레이션 결과를 **Table 3**에 나타낸다.

Table 3: The relationship between switching time and load torque values

Load torque values	Switching time for the first step [sec]	Switching time for next step [sec]
30%	2	0.5
40%	2.1	0.5
50%	2.2	0.5
60%	2.4	0.5
70%	2.7	1
80%	3	1
90%	3.4	1
100%	4	1

부하토크를 100% 정격모멘트로 증가시켰을 때, 첫 번째 단계의 스위칭시간은 4초였으며, 두 번째 단계의 스위칭시간은 1초였다.

4.3.2 전동기 부하가 속도에 따라 변할 경우

Figure 4에서 "load type"의 위치를 $M_C = k \cdot \omega^2$ 로 설정하고, Figure 5에서 resistance 위치로 조절한다.

여기서 얻어진 시뮬레이션 결과를 Table 4에 나타내며, Figure 10과 같은 유사한 패턴의 그래프를 얻을 수 있다. 이 경우 부하토크의 크기와 관계없이 첫 번째 스위칭시간은 3초를 선택하고 두 번째 단계의 스위칭시간은 0.5초로 설정하면 된다. 식 (18)에 의해 3개의 저항값을 선택하여 시뮬레이션을 하였으나, 더 많은 저항값을 설정하여 기동 단계에 적용하면 기동시간은 더 짧아지게 된다.

Table 4: The relationship between switching time and load torque values

Load torque values	Switching time for the first step [sec]	Switching time for next step [sec]
30% ω^2	1.8	0.5
40% ω^2	1.8	0.5
50% ω^2	1.8	0.5
60% ω^2	1.8	0.5
70% ω^2	1.9	0.5
80% ω^2	2	0.5
90% ω^2	2.1	0.5
100% ω^2	2.2	0.5

5. 결 론

비동기 전동기의 기동시 필요한 스위칭시간의 계산에 대하여 Simulink(Matlab)를 이용하여 모델링과 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 기동에 필요한 스위칭시간은 부하토크의 특성뿐만 아니라 전동기의 종류에 따라 다르지만, 일반적으로 부하토크가 증가할수록 스위칭시간은 늘어남을 알 수 있다.
- 2) 농형유도전동기의 star-delta 기동에 필요한 스위칭 시간이 권선형 유도전동기의 2차 저항 기동에 필요한 스위칭 시간에 비해 더 길다는 것을 확

인할 수 있었다.

- 3) 부하 종류에 따른 최적의 스위칭시간을 계산함으로써 전동기를 신속하고 효율적으로 기동할 수 있다.
- 4) 시뮬레이션에 사용된 변수들은 전동기 제조사에서 제공된 값들을 토대로 이루어졌으며, 따라서 설계에 맞게 새로운 값들로 이들 변수들을 변경하여 사전에 시뮬레이션을 실시하면 전동기 부하의 기동시간 계산이 필요한 실제 시스템을 설계하는 데에도 유익할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] William J Horvath, Concepts, Configurations & Benefits of Motor Starting and Operation with MV AC Adjustable Speed Drives, Cement Industry Technical Conference Record, pp. 258-274, 2008.
- [2] H.H. Goh, M.S. Looi and B.C. Kok, "Comparison between direct-on-line, Star-Delta and auto-transformer induction motor starting method in terms of power quality", Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, vol. II, 2009.
- [3] Sören Kling, Softstarter Handbook, ABB Automation Technology Products AB, 2003
- [4] <http://www.pdhonline.org/courses/el76/el76content.pdf>, Accessed 20. Sep, 2011.
- [5] <http://www.ece.umn.edu/users/riaz/macsim/info.pdf>, Accessed 21, Sep, 2011.
- [6] Chee-Mun Ong, Dynamic Simulations of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, USA, 1997.
- [7] John Larabee, Brian Pellegrino and Benjamin Flick, Induction motor starting methods and issues, Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, pp. 217-222, 2005.
- [8] Math Works, What is SIMULINK, The MathWorks, Inc., 2001.
- [9] Young-Jun Lee, Dynamic System Modeling, Ajin, 2010.