

# DC-link 전류정보를 기반으로 한 새로운 SRM 구동시스템

김주진\*, 김성곤\*, 이주환\*\*, 김태웅\*

\*경상대학교, \*\*Ansoft Korea

## Novel SRM Drive System Based on the DC-link Current Information

Ju-Jin Kim\*, Seong-Gon Kim\*, Ju-Hwan Lee\*\*, Tae-Woong Kim\*

\*GyeongSang National University, \*\*Ansoft Korea

### ABSTRACT

This paper newly proposes the SRM drive system based on DC-link current information, from which the phase currents can be estimated in accuracy and also they can be used in driving SRM instead of the phase currents.

Comparing to the general drive system based on the phase current information, it is verified through the simulation(which are performed by Rmxprt and Simplorer) that the proposed SRM drive system has the good performance in dynamic and steady-state responses of the speed control. Using the DC-link current information, all of the multi-phase currents can be easily estimated in driving the SRM.

### 1. 서 론

1950년대 중반 이후 꾸준히 SRM(Switched Reluctance Motor) 연구개발을 진행해 온 SRDL사(Switched Reluctance Drive Ltd.)의 Lawrenson은 1980년대 체계화된 연구결과를 발표하면서 응용연구 및 실용화가 본격적으로 시작되었으며, 초기의 전동기 구동시스템, 제어방식, 구동 토폴로지 등에 대한 연구에서 최근에는 고효율, 저소음화, 적용성 및 센서레스화에 관한 연구분야가 많은 관심을 끌며 활발하게 진행되고 있다.<sup>[1]-[5]</sup> 그 이유로서 SRM은 구조가 매우 간단하여 제작비가 절감할 수 있고, 다양한 응용분야에 사용할 수 있으며, 고효율 유도전동기보다 더 높은 고효율을 낼 수 있고, 또한 고회전력 및 견인구동력이 좋다는 특성을 지니고 있기 때문이다.

각 상의 순차적인 스위칭패턴에 따라 필요한 토크를 발생시켜 SRM을 적절하게 제어할 수 있다.

따라서 SRM을 위치·속도·전류를 제어하기 위해서는 위치 및 속도정보, 그리고 각 상의 전류정보가 필요하게 된다.<sup>[2]</sup> 여기에 있어서 SRM 고정자에 대한 상의 수가 증가할수록 각 상에 대한 전류정보를 검출하기 위해서는 전류센서의 수도 증가시킬 필요가 있다. 따라서 전류센서의 수가 증가함에 따라 전체적인 제어시스템의 가격이 높아지기 때문에 전류센서레스화 혹은 전류센서의 수를 최소화 할 필요가 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 각 상의 모든 전류정보를 검출하지 않고 DC-link측에 설치한 전류센서를 통해 검출된 DC-link 전류정보를 기반으로 하여 각 상의 전류를 추정할 수 있도록 하였고, 그리하여 각 상의 전류정보를 이용한 것과 같이 동등한 전류 제어성능을 발휘할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 그리고 SRM의 모터 모델화에 있어서 비선형특성을 충분히 고려할 수 있도록 하기위해 모터해석 전용소프트웨어 「Rmxprt」를 이용하였고, 인버터 등의 회로해석 및 제어기법 등의 시스템해석에 대해서는 파워·일렉트로닉스·시스템의 멀티도메인 시뮬레이션이 가능한 Ansoft사의 Simplorer를 이용하였다.<sup>[6]</sup> 본 논문에서 제안한 DC-link 전류정보기반을 이용한 제어알고리즘의 유효성을 Rmxprt 및 Simplorer의 시뮬레이션에 의해 검증한다.

### 2. 스위치드 릴럭턴스 모터의 원리

#### 2.1 SRM의 전압 및 토크 방정식

SRM의 1상에 대한 전압 방정식은 다음과 같다.<sup>[1],[5]</sup>

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

여기서  $V$  : 상전압,  $R$  : 권선저항,  $L(\theta, i)$  : 자기인

덕턴스,  $i$  : 상전류이다.

식(2)와 같은 co-energy  $W_c$ 의 개념을 도입한 후, 회전자 위치에 대한  $W_c$ 의 편미분을 통하여 식(3)과 같은 SRM의 토크식을 구할 수 있다.

$$W_c(\theta, i) = \int_0^i L(\theta, i) di = \frac{1}{2} L(\theta, i) \cdot i^2 \quad (2)$$

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \cdot i^2 \quad (3)$$

여기서 SRM의 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고, 위치에 대한 인덕턴스의 기울기에 따라서 토크의 부호가 달라지기 때문에 회전방향에 대하여 역방향의 토크인 **부토크**가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재한다.<sup>[1]</sup>

### 2.2 SRM의 각도에 따른 여자전류 제어

각 상의 토크를 적절하게 제어하기 위해서는 토크발생 구간에 필요한 만큼의 전류를 공급하여 여자시킬 필요가 있다. 따라서 토크발생구간의 이전에 반드시 스위치를 turn-on하여 필요한 전류를 흐르게 해야 한다. 그리고 부 토크가 발생되지 않도록 하기 위해, 역방향 토크(부토크, negative torque)가 발생하는 부분에서는 전류가 흐르지 않도록 스위치를 반드시 turn-off시킬 수 있도록 여자각도에 따라 여자전류를 제어해야 한다.

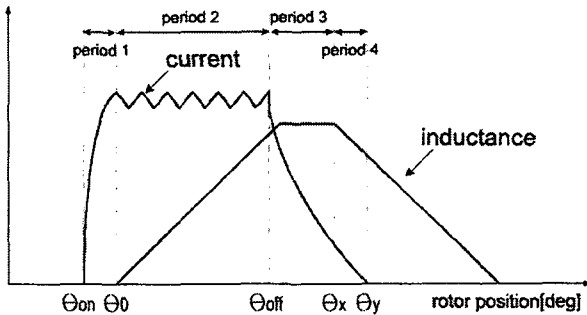


그림 1 회전자 위치에 따른 인덕턴스와 상전류의 관계

따라서 그림 2에 보여주듯이 총 4구간으로 나누어 생각할 수 있다.

- $\theta_{on} \sim \theta_0$ 의 제1구간 :  $\theta_0$ 에서 전류가 지령치가 되도록 스위치를 turn-on 하는 구간
- $\theta_0 \sim \theta_{off}$ 의 제2구간 : 일정한 토크를 발생하기 위하여 히스테리시스기법에 의해 전류를 제어하는 구간
- $\theta_{off} \sim \theta_x$ 의 제3구간 : 다음에 오는  $\theta_x \sim \theta_y$  구간에서 부 토크의 발생을 억제하기 위해서 미리 스위치를 turn-off하는 구간
- $\theta_x \sim \theta_y$ 의 제4구간 : 인덕턴스가 감소하는 구간으로

부 토크를 발생시키는 구간

### 3. DC-link 전류정보에 의한 상전류의 추정 알고리즘

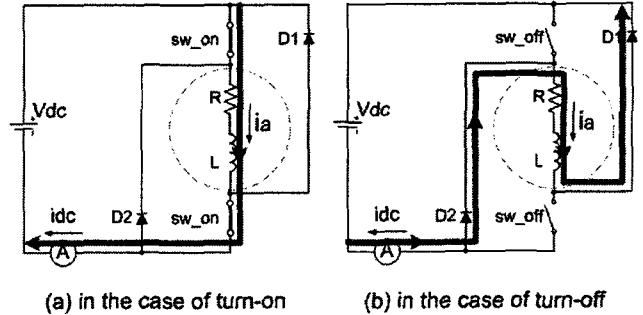


그림 2 스위치상태에 따른 상전류와 DC-link 전류의 관계; (a) turn-on인 경우, (b) turn-off인 경우

“SRM구동에 있어서, 임의의 한 상(여기서는 a상으로 설정)에 전류가 흐를 수 있도록 스위칭동작을 하는 동안에 다른 상에 대해서는 전류가 전혀 흐르지 않는다.” 라고 가정한다면, 스위치가 turn-on할 때에는 DC-link측에 흐르는 전류  $i_{dc}$ 는 그림 3(a)에 보여주듯이 a상전류와 동일한 방향으로 흐르게 되어, 식(4)와 같은 관계식을 얻게 된다.

$$i_a = i_{dc} \quad (4)$$

또한 스위치가 turn-off할 때에는 DC-link측에 흐르는 전류  $i_{dc}$ 는 그림 3(b)에 보여주듯이 a상전류와 반대방향으로 흐르게 되어, 식(5)와 같은 관계식을 얻게 된다.

$$i_a = -i_{dc} \quad (5)$$

따라서 식(4)와 식(5)에서 보여주듯이 스위치의 turn-on 및 turn-off상태와 관계없이 a상전류를 추정하기 위한 관계식은 식(6)과 같이 DC-link 전류에 대한 절대 값이 된다.

$$\hat{i}_a = |i_{dc}| \quad (6)$$

여기서  $\hat{i}_a$ 는 a상 추정전류이다.

위의 관계는 a상 추정전류 이외의 다른 상에 대한 추정전류에 대해서도 동일하게 적용될 수 있으며, 회전자의 위치정보와 함께 DC-link 전류정보로부터 a상, b상, c상에 대한 추정전류는 식(7)~(9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\hat{i}_a = F(|i_{dc}|, \theta_a) \quad (7)$$

$$\hat{i}_b = F(|i_{dc}|, \theta_b) \quad (8)$$

$$\hat{i}_c = F(|i_{dc}|, \theta_c) \quad (9)$$

여기서  $F()$ 는 상전류 추정함수,  $\hat{i}_b$ ,  $\hat{i}_c$ 는 각각 b상, c상에 대한 추정전류이고,  $\theta_a$ ,  $\theta_b$ ,  $\theta_c$ 는 각각 a상, b상, c상을 추정하기 위한 회전자의 위치영역을 나타낸다.

따라서 3상인 SRM에 대한 각 상전류의 추정은 SRM 회전자의 위치와 DC-link 전류정보로부터 계산할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 해석

본 논문에서는 시뮬레이터로써 (주)Ansoft가 제공하고 있는 파워·일렉트로닉스·시스템의 멀티도메인 시뮬레이션이 가능한 「Simplorer」와 모터해석도구인 「RMxpert」를 이용하여 가상시스템을 구현하고, 제안한 알고리즘에 대한 유효성을 검증한다.

##### 4.1 스위치드 릴럭턴스 모터모델

시뮬레이션에 사용된 SRM사양은 표 1과 같으며 그림 3(a)는 SRM외관을 보여주고, 그림 3(b)는 고정자 12극, 회전자 8극인 SRM단면도를 보여준다. SRM의 형상이나 정수에 대한 정보를 이용하여 RMxpert에 의해 비선형특성을 고려한 SRM모델을 작성하였고, 작성된 SRM모델에 대한 전류-자속곡선을 그림 4에, 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 관계를 그림 5에 각각 보여 준다.

표 1 스위치드 릴럭턴스 모터의 사양

items	unit	value
rated power	W	80
rated voltage	V	220
rated speed	rpm	815
resistance / phase	$\Omega$	113
inductance / phase	mH	9.678
number of stator/rotor pole		12/8
air gap	mm	0.45
number of turns /phase	turn	650
outer, inner diameter of stator	mm	132, 74.5

RMxpert에 의해 얻어진 SRM모델은 저항이나 인덕턴스, 기전력 항을 나타낸 전압원 등으로 구성된 회로도·데이터(Net List)로써 얻어지며, 작성된 SRM모델은 Simplorer에 직접적으로 모터모델로써 이용될 수 있고, 더욱이 회전자 위치와 인덕턴스와의 관계나 전류에 대한 자속 등이 테이블로써 출력된다. 여기에서 1상에 착목한 해석을 통해 회로도·데이터를 작성하였고, 전기각 120

도 및 240도씩 차이를 두어 3상 SRM모델을 작성하였기 때문에 고정자간의 상호인덕턴스가 고려되지 않았다.

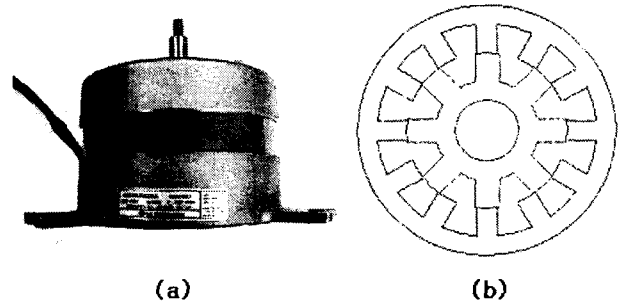


그림 3 시뮬레이션에 사용된 SRM의 외관과 단면도(12/8)

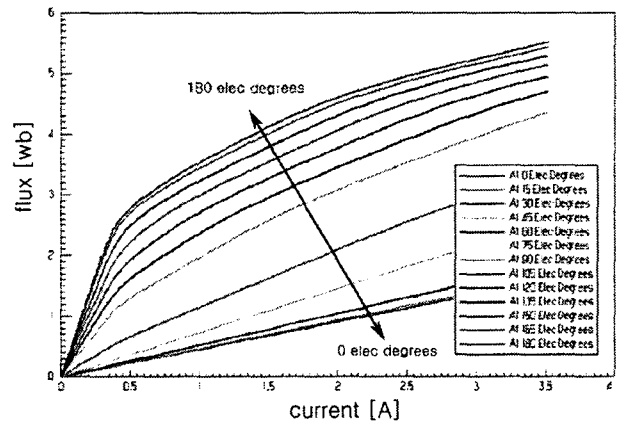


그림 4 시뮬레이션에 사용된 SRM의 전류-자속곡선

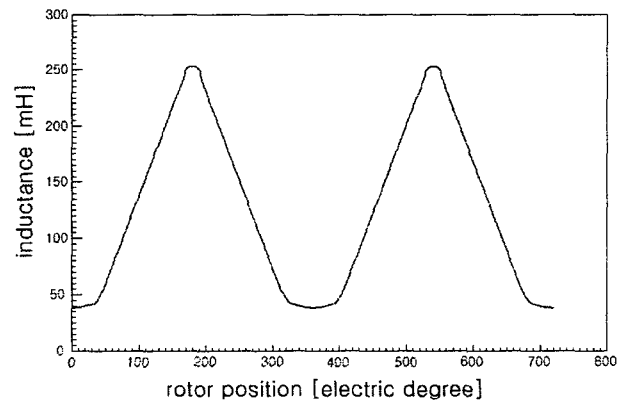


그림 5 회전자의 위치(전기각)에 따른 공극 인덕턴스의 프로파일

##### 4.2 시스템 구성

그림 3(a)과 같은 12/8인 SRM을 Rmxprt를 이용하여서 비선형특성을 고려한 SRM모델(그림 6에 있어서 부채꼴모양)을 작성한 후, Simplorer에 의한 전체 SRM 구동시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행한다(그림 6 참조). 그림 7은 SRM을 속도제어하기 위한 전체 제어블록시스템을 보여준다. 본 제

어블록시스템에는, 3상전류 혹은 DC-link 전류정보를 기반으로 하여 추정된 3상전류(DC-link 전류와 회전자 위치를 이용하여 추정장치를 통하여 추정된 3상전류)를 이용하여 SRM을 구동한다. DC-link 전압은 220V, 속도제어기의 비례게인( $K_p$ )과 적분시간( $T_i$ )은 각각 100Hz와 1ms로 설정하였다.

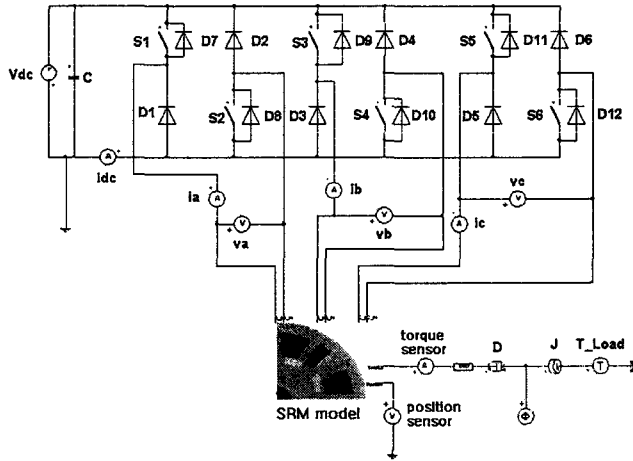
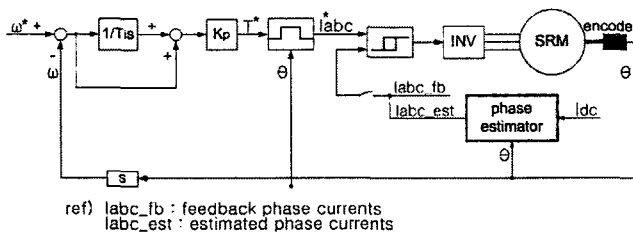


그림 6 Simulink에 의한 SRM 구동시스템



ref) labc\_fb : feedback phase currents  
labc\_est : estimated phase currents

그림 7 SRM 제어시스템의 블록도

### 4.3 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 8은 검출된 3상전류를 기반으로 하여 SRM을 속도제어 수행한 결과를, 그림 9는 DC-link 전류를 기반으로 하여 SRM을 속도제어 수행한 결과를 보여준다. 그림 8, 9에 있어서 (a)는 지령 및 실제속도, (b)는 인가된 부하토크, (c)는 발생토크, (d)~(f)는 각각 a, b, c상전류, (g)는 DC-link 전류( $i_{dc}$ )에 대한 파형을 보여준다.

지령속도의 패턴은 일정한 기울기를 가지고 0rpm에서 400rpm까지 증가시킨 후, 일정기간동안(12ms)에 400rpm을 일정하게 유지시킨다. 9ms의 시점에서는 50%부하를 인가하여 속도에 대한 과도응답을 관찰하였다. 또한 15ms의 시점에서는 지령속도를 400rpm(50%정격속도)에서 800rpm(100%정격속도)으로 스텝변화하였을 때, 속도의 과도특성을 관찰하였다. 22ms의 시점에서는 부하를 스텝상태로 제거(50%부하→무부하)하였을 때, 속도에 대한 과도상태도 함께 관찰하였다.

그림 8과 9의 시뮬레이션결과를 통하여, 지령속도에 대한 응답특성과 함께 부하에 대한 응답특성을 관측할

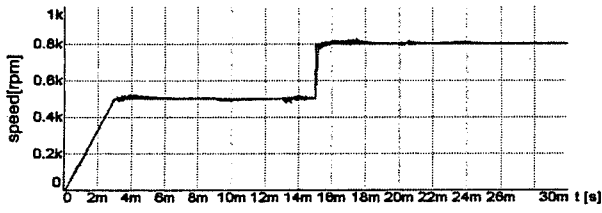
수 있었다. 3상전류 혹은 DC-link 전류를 기반으로 한 제어시스템의 성능은 거의 동일하다는 것을 시뮬레이션의 파형을 비교/검토함으로써 쉽게 확인 할 수 있었고, 따라서 SRM 상의 수에 따라 전류센서를 사용할 필요가 없이 DC-link 전류정보를 통하여 각 상의 전류정보를 추정할 수 있기 때문에, DC-link 전류정보를 통한 각 상전류를 추정할 수 있는 알고리즘의 도입은 SRM의 제어 시스템에 대한 가격경쟁력을 한층 높일 수 있다.

## 6. 결 론

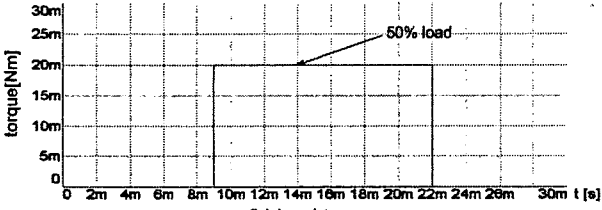
본 논문에서는 SRM 고정자에 대한 상의 수에 관계없이 DC-link 전류센서를 이용하여 각 상의 전류정보를 추정할 수 있는 새로운 전류추정방법을 제안하였으며, 추정된 각 상의 전류정보를 기반으로 하여 SRM에 대한 속도제어시스템을 시뮬레이션을 통해 구현하였다. 파워·일렉트로닉스·시스템의 멀티도메인 시뮬레이션이 가능한 Simplorer를 통하여, 기존의 각 상 전류정보를 기반으로 한 SRM 속도제어의 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제안한 DC-link 전류정보를 기반으로 한 속도제어에 대한 유효성을 검증하였다. 또한 Simplorer에 사용된 SRM모델은 비선형특성을 고려하여 모델링 할 수 있는 모터해석도구 「Rmxprt」를 사용하였고, 실제의 SRM과 거의 동일한 특성을 모터 모델을 작성하였다.

## 참 고 문 헌

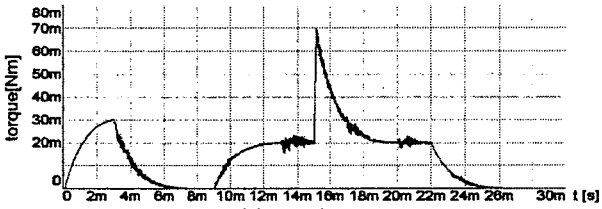
- [1] 안진우, "스위치 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2001
- [2] M. Ehsani, B. Fahimi, "Elimination of Position Sensors in Switched Reluctance Motor Drives: State of the Art and Future Trends", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.49, no.1, pp.40-47, Feb. 2002
- [3] K. Ohya, "Recent Advances of Reluctance Torque Assisted Motors (in Japanese)", IEEJ Trans. on Industry Application, vol.123, no.2, pp.63-66, 2003
- [4] P.J. Lawenson et al., "Variable-speed Switched Reluctance Motor", IEE, vol. 127, pp.253-165, July 1980
- [5] V.N. Walivadekar, V.V., Sr. Athani, G.N. Acharya, "Equivalent Circuit for Switched Reluctance Motor", Proceedings of IEEE TENCON '93, pp.568-571, Oct. 1993
- [6] "<http://www.ansoft.kr>", (Ansoft Korea 공식홈페이지)



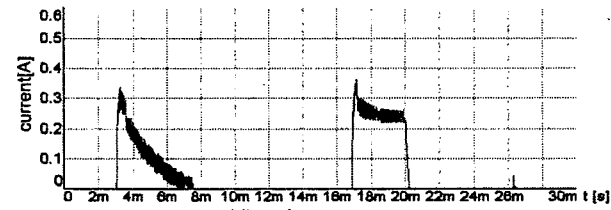
(a) reference speed and actual speed



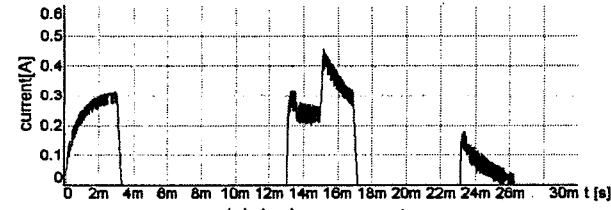
(b) load torque



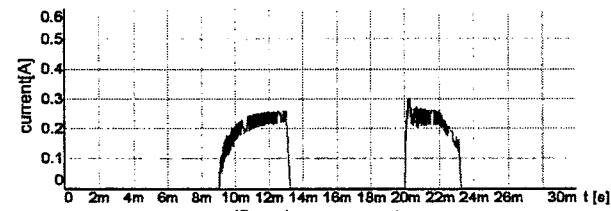
(c) actual torque



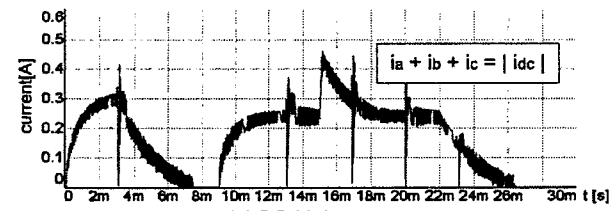
(d) a phase current



(e) b phase current

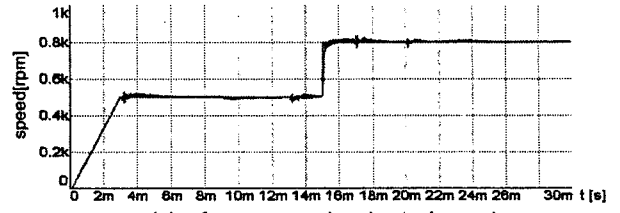


(f) c phase current

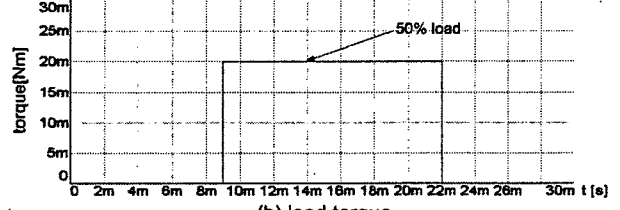


(g) DC-Link current

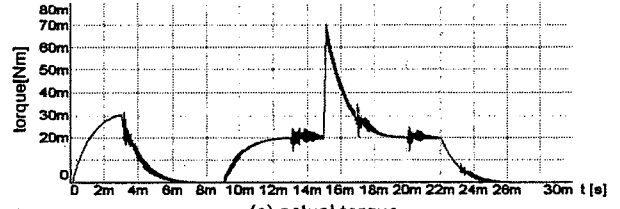
그림 8 3상전류정보를 기반으로 한 시뮬레이션결과



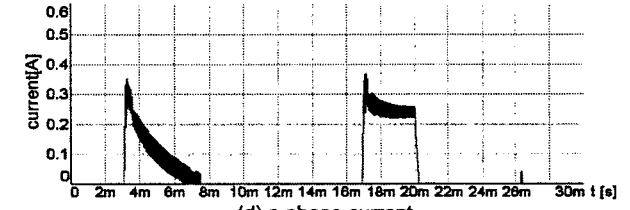
(a) reference speed and actual speed



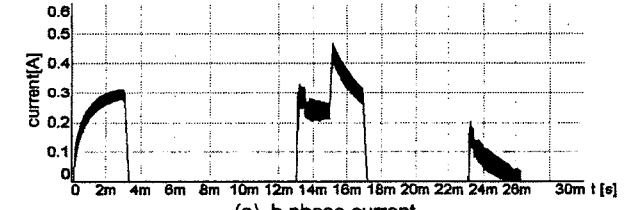
(b) load torque



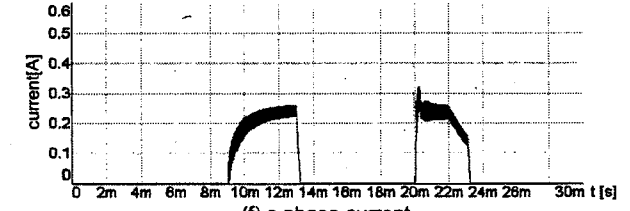
(c) actual torque



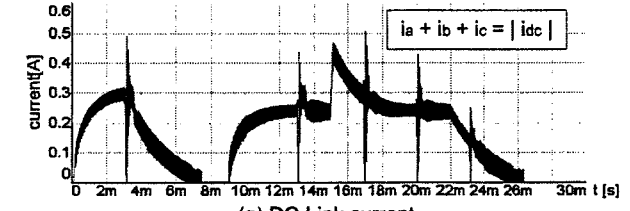
(d) a phase current



(e) b phase current



(f) c phase current



(g) DC-Link current

그림 9 DC-link전류정보를 기반으로 한 시뮬레이션결과