

## 약계자 영역에서 최대전압 설정에 관한 연구

김장목, 임익현, 류홍우

한국전력공사 전력연구원

### The Study of the method of calculating maximum voltage in Flux-Weakening Region

Jang-Mok Kim, Ick-Hun Lim, Hong-Woo Rhew

Korea Electric Power Research Institute

#### Abstract

The constraint condition is the stator voltage and the stator current to operate the motor in the flux weakening region. The maximum current is limited by the inverter current rating and the machine thermal rating. Given DC link voltage to control the motor in the flux weakening the maximum voltage is determined by considering PWM strategy, dead time, voltage drop of the inverter switching device, and the margin of the voltage for current forcing. In this paper, the new method to determine the available maximum voltage is derived by the analytic method and by considering the factors of the voltage drop. So Determining the maximum voltage is very useful to enlarge the speed operation region in the flux weakening operation, the utility of the maximum voltage is increased.

#### 1. 서론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)는 철심으로 구성된 회전자 철심 내부에 영구자석이 삽입되어 있다. 이 매입된 형상에 의하여 기계적으로는 좌우 대칭인 원통형이지만 전기적으로는 전통적인 돌극형 동기기와 반대의 전기적 특성인 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스보다 큰 전기적 돌극성이 생기고, 이 돌극성으로 인하여 영구자석에 의한 토오크 뿐만 아니라 톨력턴스 차이에 의한 토오크가 존재한다. 이로 인해 작은 체적의 회전자로 큰 토오크를 발생시킬 수 있으며, 구조가 견고하고, 작은 유효공극으로 전기자 반작용이 강하므로 일정 토오크 영역에서의 운전 뿐만 아니라 일정 출력

영역에서 약계자 제어에 의한 고속운전도 가능하다[1]-[8].

약계자 제어가 필요한 이유는 인버터의 공급전압 혹은 전동기의 절연등급에 의한 제한 전압 등의 원인에 의하여 전동기의 고정자 권선에 인가할 수 있는 전압은 일정 범위를 넘지 못하는 제한이 있기 때문이다. 전압이 제한된 경우 전동기 최대 토오크를 발생하면서 전동기 속도를 상승시켜기 위해서는 특별한 방법이 필요하다. 이러한 방법은 전동기마다 상이 하지만 근본적으로는 전동기의 역기 기전력을 발생하는 자속의 크기를 제한하는 방법을 취하여야 한다. 이러한 방법을 약계자 제어라고 하며 이 제어기가 많이 이용되는 곳은 최근 환경문제로 인하여 많은 관심이 되고 있는 전기자동차, 수직제어 공작기계에 사용되는 스핀들, 그리고 전인 등과 같은 분야에서는 약계자 제어, 즉 일정출력 영역에서의 운전은 매우 중요하다[1]-[8].

약계자 제어에 관한 연구는 최근에 많이 진행되고 있다[1]-[10]. 거의 모든 약계자 제어기는 정도의 차이는 있지만 전압과 전류가 제한된 환경에서 최대 토오크 발생 운전점을 따라 운전하고 운전속도 범위를 확장하면서 쉽게 구현 가능한 제어기의 구현이 목적이다. 전류제한은 전동기의 열용량에 의하여 제한되지만 전압은 제한된 전압조건하에서 최대 토오크 발생과 속도 상승을 위하여 필요한 전압을 정확히 계산할 필요가 있다. 약계자 제어를 하기 위하여 최대 제한전압은 전동기 시스템의 안정적인 운전과 가속성에 영향을 주기 때문에 부하조건과 전압조건을 동시에 만족시켜주는 제어기의 선정 못지않게 매우 중요하다. 이러한 제어기에서 전동기 제어에 사용되는 실제 최대 제한전압은 3상 교류에서 정류된 전압이 아니라 이 전압에서 인버터의 스위칭 소

자의 암 단락방지를 위한 데드타임, 스위칭 소자의 전압강하, 그리고 인덕턴스에 흐르는 전류의 과도상태 전압 강하 요소를 뺀 전압이 실제전압이다. 이러한 요소를 고려한 최대 전압의 정확한 선정은 제어기의 성능에 중요한 요소이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 각 전압강하 요소에 대한 설명을 해석적으로 유도하여 약계자 제어에서 최대전압 설정의 정확한 산정으로 약계자 제어시 전압 이용률을 최대한 높일 수 있다.

## 2. 본론

### 2.1 IPMSM 의 수학적 모델

본 논문에서 IPMSM의 d-q 동기 좌표계의 정상상태 전압 방정식과 발생 토오크  $T_e$ 는 아래와 같다[1]-[4]:

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_m & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

(참자 'e'는 d-q 동기 좌표계의 변수이다)

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_{qs}^e + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^e i_{qs}^e] \quad (2)$$

여기서,  $V_{ds}^e, V_{qs}^e$  : d, q 축 단자 전압,

$i_{ds}^e, i_{qs}^e$  : d, q 축 고정자 전류,

$L_{ds}, L_{qs}$  : d-q 축 고정자 인덕턴스,

$R_s$  : 고정자 저항,

$\psi_f$  : 영구자석에 의한 쇄교자속,

$\omega_e$  : 전기 각속도,  $p$  : 극 쌍수.

IPMSM은 d-q축의 들극성 ( $L_{qs} > L_{ds}$ ) 때문에 자석에 의한 토오크뿐만 아니라 릴럭턴스 토오크 성분이 존재한다.

### 2.2 일정 토오크 운전 영역의 제어

일정 토오크 영역에서 릴럭턴스 토오크를 효율적으로 이용하기 위하여 d-q 고정자 전류 벡터의 위상을 제어하여야 하며 가장 효율적인 제어는 단위 전류당 최대 토오크를 갖도록 제어하는 것이 유용하다.

$$i_{qs}^e = \text{sign}(i_s^e) \sqrt{i_s^{e2} - i_{ds}^{e2}} \quad (3)$$

여기서,  $\begin{cases} \text{if } i_s^e \geq 0, \text{ sign}(i_s^e) = 1 \\ \text{if } i_s^e < 0, \text{ sign}(i_s^e) = -1 \end{cases}$

$$i_{ds}^e = \frac{L_{ds} \psi_f - \sqrt{(L_{ds} \psi_f)^2 + (L_{qs}^2 - L_{ds}^2)(\psi_f^2 + (L_{ds} i_{sf}^e)^2 - (\frac{V_c}{\omega_e})^2)}}{L_{qs}^2 - L_{ds}^2} \quad (8)$$

여기서,  $V_c = V_{smax} - R_s I_{smax}$

$$i_{ds}^e = \frac{\psi_f - \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_{qs} - L_{ds})^2 i_s^{e2}}}{4(L_{qs} - L_{ds})} \quad (4)$$

일정 토오크 영역에서 최대 토오크 운전점은 항상 전압 제한조건 안에 있으므로 전류제한 조건만을 고려하면 되고, 식 (3)을 식 (2)에 대입하여  $i_{ds}^e$ 에 관하여 정리하고,  $i_{qs}^e$ 에 관하여 미분하면 단위 전류당 최대 토오크를 얻게 하는 식을 식 (4)와 같이 얻을 수 있다. 식 (3), (4)식에 의한 단위 전류당 최대 토오크의 궤적은 그림 1의  $O \rightarrow A$ (즉,  $i_s^e$ 의 궤적)와 같이 움직이며, 이 궤적의 한계는 최대 전류  $I_{smax}$ 에 의하여 제한된다. 여기서  $i_s^e$ 는 토오크에 비례하는 전류이며, 속도 제어기의 출력이다.

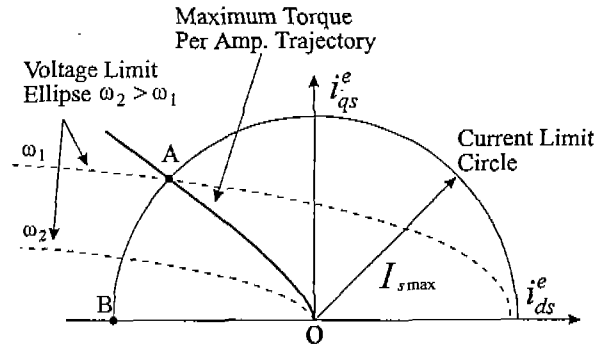


그림 1  $i_{ds}^e - i_{qs}^e$  평면상에서 전류제한원과 최대 전압 제한 타원.

### 2.3 일정 출력 영역에서의 제어

일정 출력 영역에서 최대 토오크 운전을 위한 약계자 제어는 일정 토오크 영역에서의 운전과 달리 전압과 전류 제한 조건 둘다 고려되어야 한다. 즉, 일정 토오크와 일정 출력 두 영역 간에 자연스러운 전환을 위해서 전압과 전류 제한 조건이 고려되어 최적의 약계자 운전 시작점이 결정되어야 하며, 약계자 운전 영역에서 빠른 가감속을 위해서 최대 토오크 운전점을 따라 제어 되어야 하며 이때 가장 중요한 요인은 전동기에 공급할 수 있는 전압의 크기이다. 따라서 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 전압  $V_{smax}$ 는 직류단 전압과 PWM 방법에 의하여 제한된다.

최대 전류는 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의하여 제한된다. 그러므로 전동기는 이 전압과 전류 제한 조건을 동시에 만족시켜야 하며, 식 (5), (6)과 같다[7], [9]-[10].

$$V_{ds}^e{}^2 + V_{qs}^e{}^2 \leq V_{smax}^2 \quad (5)$$

$$i_{ds}^e{}^2 + i_{qs}^e{}^2 \leq I_{smax}^2 \quad (6)$$

약계자 영역에서의 최대 토크 운전도 역시 전압과 전류 조건에 의하여 결정된다. 이 경우 단위 전류당 최대 토크를 발생하는 전류  $i_{qs}^e$ 와  $i_{ds}^e$ 는 전압 제한 원과 전류 제한 원의 교점이 되며, 약계자 영역에서 최대 토크를 발생시키는 전류  $i_{qs}^e$ 와  $i_{ds}^e$ 는 각각 식(8), (9)과 같다. 이 영역에서 속도가 증가함에 따라 전류 궤적은 그림 1에서 보여진 전류 제한 원상의 A점에서 속도의 한계점 B점으로 이동하며, 이 경로는  $i_{sf}^e$ 의 궤적이 된다. 즉, 속도가 증가함에 따라 전압 제한 타원은 그림 1에서 처럼 속도에 반 비례하여 줄어든다. 식 (8), (9)는 식(1)과 (8)을 식(6)에 대입하여 전류에 관한 수식을 얻을 수 있다.

$$i_{qs}^e = \text{sign}(i_{sf}^e) \sqrt{i_{sf}^e{}^2 - i_{ds}^e{}^2} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} \text{if } i_{sf}^e \geq 0, \text{ sign}(i_{sf}^e) = 1 \\ \text{if } i_{sf}^e < 0, \text{ sign}(i_{sf}^e) = -1 \end{cases}$$

( $i_{sf}^e$ 는 속도 제어기의 출력)

약계자 영역에서의 운전을 위해 언제 약계자 운전을 할 것인가를 결정하는 것은 매우 중요하다. 약계자 제어를 위한 최대 제한전압  $V_{smax}$ 의 절대값을 너무 크게 하여 약계자 운전이 너무 늦게 들어가면 제어전압의 부족으로 전류 제어기가 포화되어 제어기능을 상실하여 토크 저감이 필연적이다. 반대로  $V_{smax}$ 의 절대값을 너무 작게 하여 약계자제어에 너무 빨리 들어가면 일정 토크 영역의 토크를 완전히 이용하지 못하여 실제 전체 발생 토크의 크기가 줄어들어 전동기 시스템의 가속성이 떨어진다. 따라서 부하 조건과 전압 조건에 따라 약계자 운전 시작점도 달라지는데, 이의 최적점은 전압과 전류 제한 조건을 동시에 만족시켜 주는 속도가 되며, 그 속도는 식 (9)와 같다. 식 (9)는 식 (1)을 식 (5)에 대입하여 속도에 관한 수식을 얻는다. 그러나 약계자 제어를

위한 속도 최적점은 전동기상수를 정확히 알고있을 경우에는 가장 중요한 요소는 최대 전압한계이며 이 최대 전압한계를 정확히 결정하는 것이 약계자 제어에서 최대 토크를 발생하는 최적 전류 궤적과 최  $I_{smax}$ 적의 운전 시작점을 결정하는 중요 요소이다.

$$\omega_{base} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\omega_e \geq 0) \quad (9)$$

$$\begin{cases} a = (L_{qs} i_{qs}^e)^2 + (L_{ds} i_{ds}^e)^2 + \psi_f^2 + 2L_{ds} \psi_f i_{ds}^e \\ b = 2(L_{ds} - L_{qs}) R_s i_{ds}^e i_{qs}^e + 2R_s \psi_f i_{qs}^e \\ c = R_s^2 (i_{ds}^e{}^2 + i_{qs}^e{}^2) - V_{smax}^2 \end{cases}$$

## 2.4 최대전압 $V_{smax}$ 의 결정

최대 이용 가능한 전압  $V_{smax}$ 의 값은 앞에서 언급된 바와 같이 AC 전원에서 정류된 직류단 전압과 PWM 방법에 따라 다르다. 직류단 전압은 3상 AC 220V를 다이오드 브리지를 이용하여 전과 정류를 하였을 경우 직류단 전압은 300V이다.

PWM 방법이 삼각파 PWM일 때 이용 가능한 최대 직류단 전압은 그림 2에서 보여지듯이 인버터 육각형에서 내접하는 원의 반지름인  $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이다. 히스테리시스 전류 제어기의 경우에 사용 가능한 최대 전압은  $2/3 V_{dc}$ 이지만 실제 시스템에서 전동기에 인가되는 등가전압이 크기는 육각형과 등가면적인 반지름이  $0.6 V_{dc}$ 인 원이고, 공간 벡터 PWM을 이용할 경우 구현할 수 있는 최대 전압은  $2/3 V_{dc}$ 이며, 등가면적의 기준을 볼 때의 최대전압은  $0.6 V_{dc}$ 이지만 이 부분에서의 전압은 선형적인 제어가 되지 못하고 과변조에서 제어되어야 한다[11]-[12]. 제어전압이 과변조 영역에 있을 때는 과변조 기법등을 이용하여야 하므로 본 논문에서는 이 부분에 대한 언급은 생략한다[13]. 따라서 본 논문에 사용된 PWM 기법은 공간전압벡터 PWM이므로 선형적으로 제어 가능한 전압한계는 육각형의 내접원이 되므로 최대 전압은  $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이다. 그러나 이 전압도 전동기에서 완전히 사용할 수 있는 전압이 아니다. 즉 인버터의 상하 압의 단락을 방지하기 위한 데드타임, 스위칭 소자에 의한 전압강하, 그리고 인덕턴스의 전류변화에 대한 전압강하만큼 전압을 뺀 나머지

전압이 실제 전동기에 인가되는 전압이다. 각각의 항에 대하여 구체적인 값은 아래와 같다.

### (1) 데드타임

데드타임은 3상 평형 PWM 인버터에서 각 상의 스위칭 소자 상하간에 단락을 피하기 위해서는 반드시 필요하다. 주어진 시스템에서 데드타임

$T_d$ 이  $3.8\mu\text{sec}$  일 때 이 데드타임에 의한 전압 강하  $V_{dt}$ 는 아래 수식에서 2는 상하 스위칭 소자가 2개이므로 2가 되고 전류 제어기의 샘플링 주파수 즉 스위칭 주기는  $100\mu\text{sec}$  이므로 전동기에서 최대전압으로 선정되는 값은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_{dt} = \frac{2 T_d}{T_s} \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} = 13.164 V \quad (10)$$

### (2) 스위칭 소자에 의한 전압강하

실험에 사용된 스위칭 소자는 IGBT(Semikron :SKM 75GB 12ID)이다. 이 소자의 전압강하는 대략  $2.5 \sim 3.5V$ 이며, 인버터 소자의 한 상에 해당하는 최대 전압강하는 아래식과 같다[14].

$$\frac{4}{3} V_{drop} \approx 4.667 V \quad (11)$$

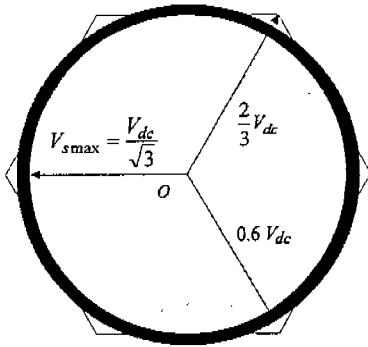


그림 2 약계자 제어시 최대 전압의 한계

### (3) 전류변화에 의한 전압 강하분

동기 전동기의 과도상태를 포함한 전체의 전압 방정식은 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + L_{ds} \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e L_{qs} i_{qs}^e \\ V_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + L_{qs} \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e L_{ds} i_{ds}^e + \omega_e \psi_f \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식에서 과도상태에 해당하는 수식은 유도기나 보통의 영구자석 동기 전동기의 경우 수 mH 정도이고 관성 모멘트가 상대적으로 크기

때문에 무시할 수 있지만 관성모멘트가 작아 가속되는 정도가 빠르거나 공극이 작아 상대적으로 인덕턴스가 큰 전동기일수록 이 부분에 의한 전압 강하분은 무시할 수 없을 정도로 크다. 그리고 과도상태 수식은 오른쪽 두번째 수식이며 이들 항에 의한 d-q축의 전압 강하분은 아래 수식과 같다.

$$\Delta V_{ds}^e = L_{ds} \frac{di_{ds}^e}{dt}, \quad \Delta V_{qs}^e = L_{qs} \frac{di_{qs}^e}{dt} \quad (13)$$

d-q전류 변화분에 대한 과도상태 전압강하분을 얻기 위해서는 편의상 실험 파형인 그림 3을 이용하면 이 실험 파형에서 과도상태의 시간은 그림에서 보여진 것과 같이  $\Delta t$ 이며, 변화분의 시간은  $\Delta t \approx 65ms$ 이다. d-q축 전류 변화분은 각각  $\Delta i_{ds}^e \approx -3.7A$ ,  $\Delta i_{qs}^e \approx -4.34A$ 이며 d-q 전류 변화분에 의한 d-q축의 과도상태 전압성분  $\Delta V_{ds}^e$ ,  $\Delta V_{qs}^e$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{ds}^e &= 27 \times 10^{-3} \frac{-3.7}{65 \times 10^{-3}} = -1.54 V \\ \Delta V_{qs}^e &= 67 \times 10^{-3} \frac{-4.34}{65 \times 10^{-3}} = -4.474 V \end{aligned} \quad (14)$$

인덕턴스에서 전류변화에 의한 과도상태 때의 전압분  $V_{mrg}$ 는 아래 식과 같다.

$$V_{mrg} = \sqrt{\Delta V_{ds}^e{}^2 + \Delta V_{qs}^e{}^2} > 4.73 \quad (15)$$

따라서 데드타임, 스위칭 소자에 걸리는 전압강하, 그리고 인덕턴스의 과도상태 전압강하의 총합은 식 와 같다. 이 유도 식에서 알 수 있듯이 3가지 요소에 의한 전압차이는 아래 수식과 같으며 실제 계산에 의한 전압 강하분은 22.56V 이상이지만 실제 전동기 제어에 사용되는 최대전압은 23V 이므로 직류단에서 정류되어 상전압으로 나타난 전압 173V와 제어에서 사용된 전압 150V의 차이 전압인 23V와 일치한다.

$$\begin{aligned} \therefore V_{total} &= V_{dt} + \frac{4}{3} V_{drop} + V_{mrg} \\ &> 22.56 V \end{aligned} \quad (16)$$

## 3. 실험

실험에 사용된 전동기의 사양은 표1에 있는 바와 같이 900W IPMSM이며 5-KHz IGBT 인버터에 의하여 구동되며 전체 시스템은 TMS320C31

DSP를 이용하여 전 디지털 시스템(Full Digital System)으로 구현되며 전체 블록도는 그림 2에 나타나져 있다. 전동기 제어에 사용된 전류 제어기의 샘플링 시간은 100 [ $\mu\text{sec}$ ]이며, 속도 제어 주기와 약계자 제어 주기는 1 [ $\text{msec}$ ]이다. 약계자 제어에 사용되는 최대전압은 AC220V 3상을 다이오드 전파정류를 하였을 경우의 전압은 173[V]이지만, 실제 전압은 앞에서 언급되었듯이  $V_{smax}$ 은 150[V]이다.

그림 3은 전동기를 약계자 제어했을 때의 실험파형이며 그림 3(a)는 속도파형, 그림3(b)는 속도제어기의 출력전류, 그림3(c)는 전류 제어기의 출력전압이며, 그림3(d), (e)는 d-q축 전류성분이며 이 그림으로부터 알 수 있는 것은 최대전압 한계가 적절히 선정되었다.

#### 4. 결론

본문에서는 약계자 제어시 2가지 제한 조건중 하나인 최대 전압의 한계를 해석적 방법으로 정확히 산출할 수 있는 방법을 제시하여 약계자제어시 전압이용 한계를 정확히 하여 전압 이용률을 높일 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 최대전압을 설정하기 위하여 실험 파형도 함께 제시하여 타당성을 검증하였다.

표 1. 실험에 사용된 전동기 사양

|                                                                |
|----------------------------------------------------------------|
| 900[W], 220[V], 4[pole], 1700[rpm]                             |
| $R_s$ :4.3[ $\Omega$ ], $\psi_f$ :0.272[Wb], $L_{ds}$ :27[mH], |
| $L_{qs}$ :67[mH], $V_{DC}$ =300[V], $I_{rate}$ =3[A],          |
| $I_{smax}$ =2 $I_{rate}$                                       |

#### 참고문헌

[1] T. M. Jahns, G. B. Kliman and T. W. Neumann, "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, no.4, July/Aug., pp.738~747, 1986.

[2] S. R. MacMinn and T. M. Jahns, "Control Techniques for Improved High-Speed Performance of Interior PM Synchronous motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-27, no. 4, Sep./Oct., pp.997~1004, 1991.

[4] Jang-Mok Kim and Seung-Ki Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux

Weakening Operation," in Proc. IEEE/IAS Conf. Rec., pp.216~221, 1995.

[8] R. Monajemy and R. Krishnan, "Implementation Strategies for Concurrent Flux Weakening and Torque Control of the PM Synchronous Motor," *IEEE-IAS Conf. Rec., Brushless Motor, IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp.386-392, 1994.

[10] 김 상훈, "약계자 영역에서 유도 전동기의 최대 토크 운전," 서울대학교 대학원 전기공학 공학 박사학위 논문, 1994년 8월

[11] 이 동춘, "다변수 상태 제환을 이용한 유도전동기 구동 시스템의 전류 제어," 서울대학교 대학원 전기공학과 공학 박사 학위 논문, 1993년 8월.

[12] H. W. Van der Broeck, H. C. Skudelny, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors," *IEEE Trans. on Ind. Appl.* vol. IA-24, no.1, pp.142-150, 1988.

[13] Jul-Ki Seok and Seung-Ki Sul, "A New Overmodulation strategy for induction Motor Drive Using Space Vector PWM," *IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp.211-216, 1995.

[14] Jong W. Choi, Sung I. Yong and Seung K. Sul "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation," *IEEE APEC*, 1994, pp.100-106.

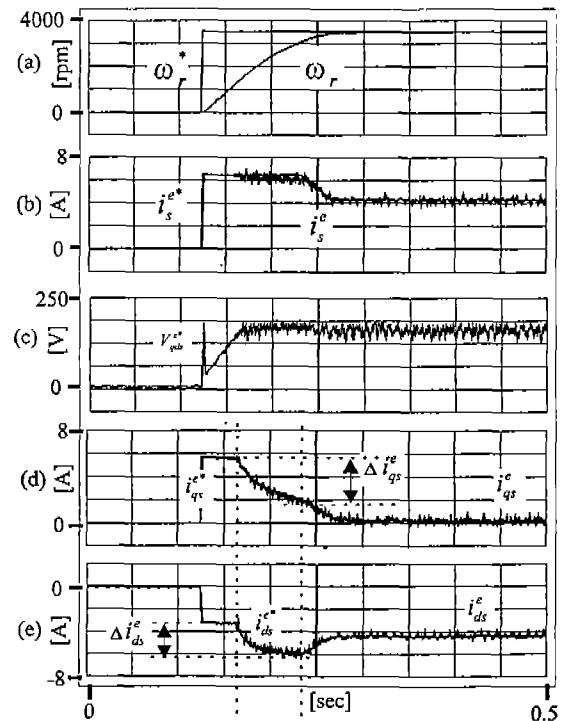


그림 3 약계자 제어에서 최대전압 한계를 결정하기 위한 실험파형