

매입형 영구자석 동기전동기의 약계자 제어를 위한 최대전압 선정에 관한 연구

김장목[†] · 김수열 · 류호선 · 안용호 · 윤기갑 · 임익현 · 전향식^{*}

한국전력공사 전력연구원 · *한국항공우주사업(주)

(2000. 2. 22. 접수 / 2000. 3. 21. 채택)

Study of the Method of Calculating Maximum Voltage for Flux-Weakening Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Jang-Mok Kim[†] · Su-Yeol Kim · Ho-Seon Ryu · Yong Ho An · Gi Gab Yoon
Ik-Hun Lim · Hyang-Sig Jun^{*}

Korea Electric Power Corporation Research Institute · *Korea Aerospace Industries, LTD

(Received February 22, 2000 / Accepted March 21, 2000)

Abstract : The constraint conditions are 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 quantitative method and by considering the factors of the voltage drop. The proposed method to determine the maximum voltage is very useful to improve the stability of the motor system and to enlarge the speed operation region in the flux weakening operation. Therefore the utility of the maximum voltage is increased

1. 서론

매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)는 철심으로 구성된 회전자의 철심 내부에 영구자석이 삽입되어 있다. 이 매입된 형상에 의하여 기계적으로는 좌우 대칭인 원통형이지만 전기적으로는 전통적인 돌극형 동기기기과 반대의 전기적 특성인 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스보다 큰 전기적 돌극성이 생기고, 이 돌극성으로 인하여 영구자석에 의한 토크 뿐만 아니라 릴럭턴스 차이에 의한 토크가 존재한다. 이로 인해 작은 체적의

회전자로 큰 토크를 발생시킬 수 있으며, 구조가 견고하고, 작은 유효공극으로 전기자 반작용이 강하므로 일정 토크 영역에서의 운전뿐만 아니라 일정 출력 영역에서 고속운전도 가능하다¹⁾⁹⁾.

인버터의 공급전압 혹은 전동기의 절연등급에 의하여 전동기 고정자 권선에 공급할 수 있는 전압은 일정 범위를 넘지 못하는 제한이 있기 때문에 전동기의 속도도 전압 크기에 비례하여 제한된다. 전동기의 속도는 속도가 상승함에 따라서 역기전력도 속도에 비례하여 상승하며 최고 상승 가능한 속도는 전동기에 인가되는 제한된 전압과 역기전력이 거의 같아질 때까지이다. 제한된 전압하에 전동기가 최대 토크를 발생하면서 전동기 속도를 상승시키기 위해서는 특별한 방법이 필요하다. 이러한 방법은 전동기마

[†]To whom correspondence should be addressed.
kjm@kepri.re.kr

다 다르지만 근본적인 원리는 전동기의 역기기 전력을 발생하는 자속의 크기를 제한하는 방법을 취하여야 하며 이러한 방법을 약계자 제어라고 한다. 약계자 제어가 많이 이용되는 곳은 최근 환경문제로 인하여 많은 관심이 되고 있는 전기 자동차, 수치제어 공작기계에 사용되는 스피들, 그리고 견인 등과 같은 분야에서는 약계자 제어, 즉 일 정출력 영역에서의 운전은 매우 중요하다^{1~8)}.

약계자 제어에 관한 연구는 최근에 많이 진행 되고 있다^{1~8)}. 거의 모든 약계자 제어기는 정도의 차이는 있지만 전압과 전류가 제한된 환경에서 최대 토크 발생 운전점을 따라 운전하고 운전속도 범위를 확장하면서 쉽게 구현 가능한 제어기의 실현이 목적이다. 전류제한은 전동기의 열적응 용량에 의하여 제한되지만 전압은 제한된 전압 조건하에서 최대 토크 발생과 속도 상승을 위하여 필요한 전압을 정확히 계산할 필요가 있다. 약계자 제어를 하기 위하여 최대 제한전압의 결정은 전동기 시스템의 안정적인 운전과 가속성에 영향을 준다. 약계자 영역에서의 운전을 위해 전압 여유분을 확보하기 위하여 최대 전압 제한값을 적게 설정하면 약계자 운전 시작점이 빨라지고 일정 토크 영역의 출력을 충분히 이용하지 못하여 약계자 운전이 빈번한 시스템에서는 응답성이 떨어진다. 그러나 최대 전압 제한값을 너무 크게 설정하면 약계자 운전이 너무 늦게 들어가 제어전압의 부족으로 전류제 어기가 포화된 시점부터는 전류제어기가 포화되어 토크 저감이 필연적이다. 따라서 언제 약계자 운전을 할 것인가를 결정하는 것은 매우 중요하다. 약계자 운전이 너무 늦게 들어가면 전압의 부족으로 전류 제어기가 포화되어 토크 저감이 필연적이며 너무 빨리 들어가면 일정 토크 영역의 토크를 완전히 이용하지 못하여 시스템의 가속성이 떨어진다. 그리고 전동기 제어에 사용되는 실제 최대 제한전압은 3상 교류에서 정류된 전압이 아니라 이 전압에서 인버터의 스위칭 소자의 암 단락방지를 위한 데드타임, 스위칭 소자의 전압강하, 그리고 인덕턴스에 흐르는 전류의 과도상태 전압 강하 요소를 뺀 전압이 실제 전압이다. 이러한 요소를 고려한 최대 전압의 정확한 결정은 약계자 제어기의 성능에 결정적인 영향을 주는 중요한 요소 중의 하나이다. 그러나 이러한 정량적인 방법을 이용하지 않는다면 최

대 전압제한 값을 반복적인 실험을 통하여 결정 해야 하는 번거로움이 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 각 전압강하 요소에 대한 설명을 정량적인 방법을 이용하지 않는다면 최대전압 설정의 정확한 계산을 각각의 요소별로 계산하여 실제 시스템에서 약계자 제어시 최대 전압의 효과적인 이용이 가능하다.

2. 이론적 배경

2.1. IPMSM의 수학적 모델

본 논문에서 IPMSM의 d-q 동기 좌표계의 정상상태 전압 방정식과 발생 토크에 관한 수식 T_e 는 식 1)과 같다:

$$\begin{bmatrix} V_{d_s}^e \\ V_{q_s}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_{\sigma} \\ \omega_e L_{\sigma} & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_s}^e \\ i_{q_s}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

(첨자 'e'는 d-q 동기 좌표계의 변수이다)

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_{q_s}^e + (L_{\sigma} - L_{\sigma'}) i_{d_s}^e i_{q_s}^e] \quad (2)$$

여기서, $V_{d_s}^e, V_{q_s}^e$: d, q 축 단자 전압

$i_{d_s}^e, i_{q_s}^e$: d, q 축 고정자 전류

$L_{\sigma}, L_{\sigma'}$: d, q 축 고정자 인덕턴스

R_s : 고정자 저항

ψ_f : 영구자석에 의한 쇄교자속

ω_e : 전기 각속도

p : 극 쌍수

IPMSM은 d-q축의 돌극성 ($L_{\sigma} > L_{\sigma'}$) 때문에 자석에 의한 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크 성분도 존재한다^{1~8)}.

2.2. 일정 토크 운전 영역의 제어

일정 토크 운전 영역에서 릴럭턴스 토크를 효율적으로 이용하기 위하여 가장 효율적인 제어는 단위 전류당 최대 토크를 갖도록 제어하는 것이 유용하다. 일정 토크 영역에서 최대 토크 운전점은 항상 전압 제한조건 안에 있으므로 전류제한 조건만을 고려하면 되고, 식 3)을 식 2)에 대입하여 $i_{d_s}^e$ 에 관하여 정리하고, $i_{q_s}^e$ 에 관하여 미분하면 단위 전류당 최대 토크를 얻게 하는 식을 식 4)와 같이 얻을 수 있다.

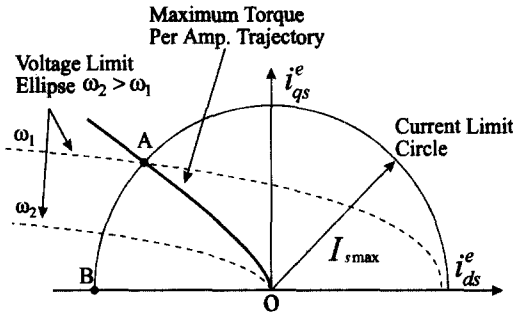


Fig. 1. The current limit circle and the voltage limit ellipse in the $i_{ds}^e - i_{qs}^e$ plane

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

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

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

식 3), 4)식에 의한 단위 전류당 최대 토크의 궤적은 Fig. 1의 O→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 토크에 비례하는 전류이며, 속도 제어기의 출력이다^{4)~8)}.

2.3. 일정 출력 영역에서의 제어

일정 출력 영역에서 최대 토크 운전을 위한 약계자 제어는 일정 토크 영역에서의 운전과 달리 전압과 전류 제한 조건 둘 다 고려되어야 한다. 즉, 일정 토크와 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 토크 운전점을 따라 제어되어야 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

^{6~8)}. 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^{6~8)}.

$$V_{ds}^{e2} + V_{qs}^{e2} \leq V_{smax}^2 \quad (5)$$

$$i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2} \leq I_{smax}^2 \quad (6)$$

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 7), 8)과 같다. 이 영역에서 속도가 증가함에 따라 전류 궤적은 Fig. 1에서 보여진 전류 제한 원상의 A점에서 속도의 한계점 B점으로 이동하며, 이 경로는 i_{qs}^e 의 궤적이 된다. 즉, 속도가 증가함에 따라 전압 제한 타원은 Fig. 1에서처럼 속도에 반 비례하여 줄어든다^{6~8)}.

$$i_{qs}^e = \text{sign}(i_{sf}^e) \sqrt{i_{sf}^{e2} - i_{ds}^{e2}} \quad (7)$$

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)

여기서,

$$V_c = V_{smax} - R_s I_{smax} \quad (\text{If } T_r, \omega_r > 0)$$

$$V_c = V_{smax} + R_s I_{smax} \quad (\text{If } T_r, \omega_r < 0)$$

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 제어가 포화되어 제어기능을 상실하여 토크 저감이 필연적이다. 반대로 V_{smax} 의 절대값을 너무

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

작게 하여 약제자 제어에 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 약제자 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 약제자 제어를 위한 속도 최적점은 전동기 상수를 정확히 알고 있을 경우에는 가장 중요한 요소는 최대 전압한계이며 이 최대 전압한계를 정확히 결정하는 것이 약제자 제어에서 최대 토크를 발생하는 최적 전류제과 최적의 운전 시작점을 결정하는 중요 요소이다^{6~8)}.

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

여기서,

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

일정 출력 영역에서 성능이 좋은 약제자 제어를 구현하기 위한 최대 토크 발생과 최적의 운전 시작점을 결정하기 위해서는 전동기의 상수 뿐만 아니라 최대 전압 V_{smax} 의 결정이 매우 중요할 뿐만 아니라 제어기의 성능에도 증대한 영향을 줄 수 있음을 약제자 제어에 관한 수식 7), 8), 그리고 9)에서 알 수 있다.

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 전파 정류를 하였을 경우 직류단 전압은 약 300V이다.

PWM 방법에 따라서 이용 가능한 전압의 한계는 다르지만 본 논문의 실험에서는 공간벡터 PWM방법을 사용하고 이 방법을 기초로 설명하면 다음과 같다. 공간벡터 PWM을 이용할 경우 구현할 수 있는 최대전압은 $2/3 V_{dc}$ 이며, 등가

면적의 기준을 볼 때의 최대전압은 $0.6 V_{dc}$ 이지만 이 부분에서의 전압은 선형적인 제어가 되지 못하고 어떤 범위에서는 과변조에서 제어되어야 한다^{9~11)}. 제어전압이 과변조 영역에 있을 때는 과변조 기법을 이용하여야 하므로 본 논문에서는 이 부분에 대한 언급은 생략한다. 따라서 본 논문에서 사용된 PWM기법은 공간전압벡터 PWM이므로 선형적으로 제어 가능한 전압한계는 육각형의 내접원이 되므로 최대 전압은 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이다. 삼각파 PWM과 히스테리시스 PWM을 이용할 경우에는 최대 이용 가능한 전압의 범위는 달라지지만 본 논문에서는 더 이상 언급은 생략한다. 이미 서론에서도 약간 언급되었지만 전압 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 도 전동기에서 완전히 사용할 수 있는 전압이 아니다. 즉 인버터의 상하 암(Arm)의 단락을 방지하기 위한 데드타임, 스위칭 소자에 의한 전압강하, 그리고 인덕턴스의 전류변화에 대한 전압강하만큼 전압을 뺀 나머지 전압이 실제 전동기에 인가되는 전압이다. 각각의 전압강하 요소 항에 대하여 구체적인 값은 식 10)과 같다.

2.4.1. 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 인버터 한 암(arm)의 상하 스위칭 소자가 2개이므로 2가 되고 전류 제어기의 샘플링 주파수 즉 스위칭 주기 T_s 는 $100\mu\text{sec}$ 이므로 전동기에서 최대 전압으로 선정되는 값은 아래와 같이 구할 수 있다.

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

2.4.2 스위칭 소자에 의한 전압강하

실험에 사용된 스위칭 소자는 IGBT (Semikron: SKM 75GB 121D)이다. 이 소자의 전압강하는 대략 2.5~3.5V이며, 인버터 소자의 한 상에 해당 하는 최대 전압강하는 식 11)과 같다^{12~14)}.

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

2.4.3. 전류변화에 의한 전압 강하분

동기 전동기의 과도상태를 포함한 전체의 전압 방정식은 식 12)와 같다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + L_{ds} \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e L_{\sigma} i_{qs}^e$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + L_{\sigma} \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e L_{ds} i_{ds}^e + \omega_e \psi_f \quad (12)$$

식 12)에서 과도상태에 해당하는 수식은 유도기나 보통의 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 경우 수mH 정도이고 관성 모멘트가 상대적으로 크기 때문에 무시할 수 있지만 관성 모멘트가 작게 설계되어 가속되는 정도가 빠르거나 공극이 작아 상대적으로 인덕턴스가 큰 전동기이면 이 부분에 의한 전압 강하분은 무시할 수 없을 정도로 크다. 그리고 과도상태 수식은 오른쪽 두 번째 수식이며 이들 항에 의한 d-q축의 전압 강하분은 식 13)과 같다.

$$\Delta V_{ds}^e = L_{ds} \frac{di_{ds}^e}{dt}$$

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

d-q전류 변화분에 대한 과도상태때 인덕턴스 양단의 전압강하분을 얻기 위해서는 편의상 전류에 관한 실험 파형의 일부분을 확대한 그림 3을 이용하면 이 실험 파형에서 과도상태의 시간은 Fig. 3에서 보여진 것과 같이 Δt 이며, 변화분의 시간은 $\Delta t \approx 65ms$ 이다. d-q축 전류 변화분은

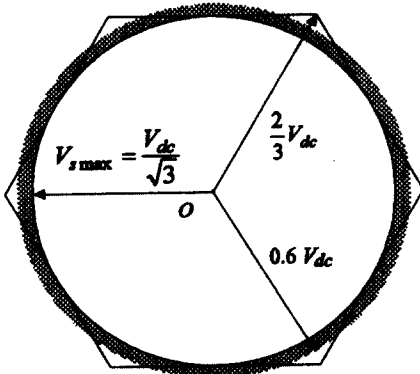


Fig. 2. Limit of the maximum voltage in the flux weakening operation

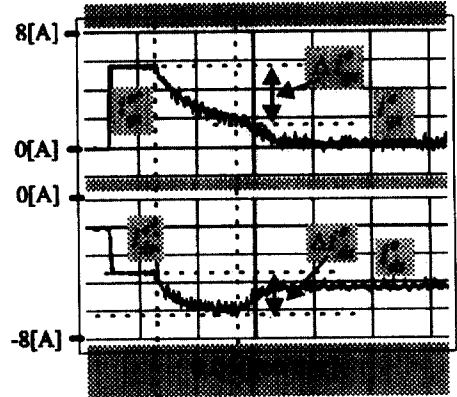


Fig. 3. Enlargement of the actual current waveforms from Fig. 5

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 ΔV_{ds}^e , ΔV_{qs}^e 은 다음과 같다.

$$\Delta V_{ds}^e = 27 \times 10^{-3} \frac{-3.7}{65 \times 10^{-3}} = -1.54V$$

$$\Delta V_{qs}^e = 67 \times 10^{-3} \frac{-4.34}{65 \times 10^{-3}} = -4.474V \quad (14)$$

인덕턴스에서 전류변화에 의한 과도상태 때의 전압분 V_{max} 는 식 15)와 같다.

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

따라서 데드타임, 스위칭 소자에 걸리는 전압 강하, 그리고 인덕턴스의 과도상태 전압강하의 총 합은 식 16)과 같다. 유도된 식 16)에서 알 수 있듯이 3가지 요소에 의한 전압차이는 아래 수식과 같으며 실제 계산에 의한 전압 강하분은 22.56V 이상이지만 실제 전동기 제어에 사용될 때 최대 전압 강하분이 23V이므로 직류단에서 정류되어 상전압으로 나타나 선형 영역에서 이용 가능한 전압은 173V이지만 전압 강하 요소를 실제 고려한 약계자 영역에서 본 실험에 사용된 스위칭 소자와 전동기를 이용하였을 경우에 인버터가 전동기에 인가 가능한 전압은 150V이다.

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

4. 실험

4.1. 실험 방법

실험에 사용된 전동기의 사양은 Table. 1에 있는 바와 같이 900W IPMSM이며 5-KHz IGBT 인버터에 의하여 구동되며 전체 시스템은 TMS 320C31 DSP를 이용하여 전 디지털 시스템(Full Digital System)으로 구현되었으며 전체 블록도는 Fig. 4에 나타나져 있다. 전동기 제어에 사용된 전류 제어기의 샘플링 시간은 100 [μsec]이며, 속도 제어 주기와 약계자 제어 주기는 각각 1 [msec]이다. 약계자 제어에 사용되는 최대 전압은 AC220V 3상을 다이오드 전파정류를 하였을 경우 인버터에서 이용 가능한 이상적인 전압은 173[V]이지만, 실제 전압은 앞에서 언급되었듯이 V_{smax} 은 150[V]이다.

Table 1. Machine rating

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

4.2. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 전동기를 약계자 제어했을 때의 실험 파형이며 Fig. 5(a)는 속도파형, Fig. 5(b)는 속도 제어기의 출력전류, Fig. 5(c)는 전류 제어기의 출력전압이다.

이 출력전압의 크기는 전송기의 속도가 정상

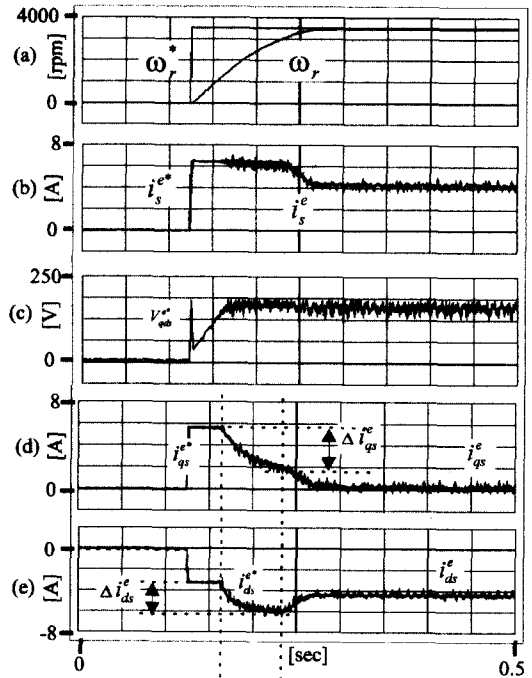


Fig. 5. Experimental Waveforms to determine the limitation of the maximum voltage in the flux weakening operation

상태 도달 이후에는 전류변화에 의한 전압강화 성분이 없기 때문에 약 150[V]인 것을 알 수 있다. 이것은 본 논문에서 정량적인 해석에 의하여 얻어진 전압과 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(d), (e)는 d-q축 전류성분이며 실제전류가 기준치 전류에 잘 추종함을 알 수 있다. 이상과 같이 Fig. 5(a), (d), 그리고 (e)에서 알 수 있듯이 약계

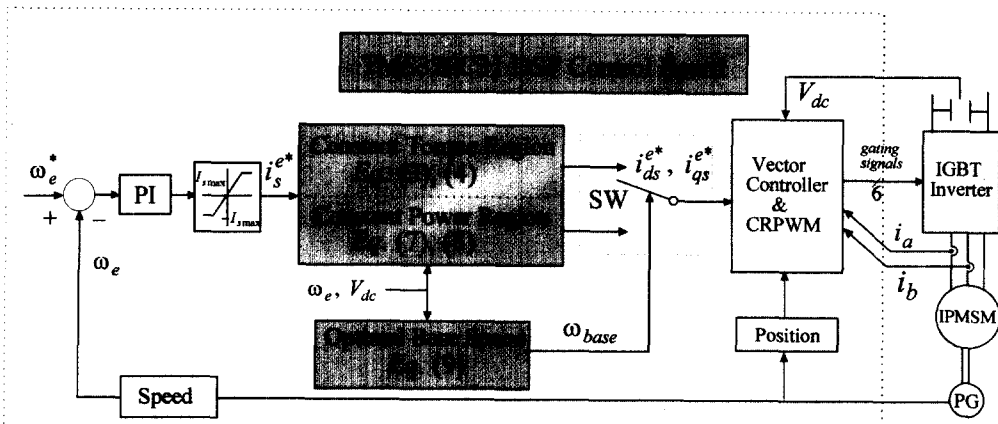


Fig. 4. Overall motor drive system

자 영역에서 인버터 전압의 효과적인 이용을 위한 최대 전압한계를 설정하는 방법의 유용성을 실험결과 파형 Fig. 5에서 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 약계자 제어시 전류제한 조건과 전압제한 조건중 하나인 최대 전압의 한계를 해석적 방법으로 정확히 산출할 수 있는 방법을 제시하여 약계자 제어시 전압이용 한계를 정확히 하여 전동기 시스템의 안정적인 운전 뿐만 아니라 전압 이용률을 높일 수 있는 정량적인 방법을 제시하였다. 제안된 방법에 의한 최대 전압선정의 유용성과 타당성을 실험결과 파형으로부터 알 수 있었다.

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.
- 3) S. Morimoto, M. Sanada and Y. Taketa, "Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-30, No. 4, July/Aug., pp. 920~926, 1994.
- 4) Jang-Mok Kim and Seung-Ki Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA- 33, No. 1, Jan./Feb., pp. 156~160, 1997.
- 5) R. Monajemy and R. Krishnan, "Implementation Strategies for Concurrent Flux Weakening and Torque Control of the PM Synchronous Motor," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp. 386~392, 1994.
- 6) 김 장목, "매입형 영구자석 동기전동기의 제어특성 개선," 서울대학교 대학원 전기공학부 공학 박사학위 논문, 1996년 8월.
- 7) Jang-Mok Kim and Seung-Ki Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp. 386~392, 1995.
- 8) Jang-Mok Kim and Seung-Ki Sul, "Improved Dynamic Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive in Flux-Weakening Operation," *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 1562~1567, 1996.
- 9) 이 동춘, "다변수 상태 궤환을 이용한 유도전동기 구동 시스템의 전류 제어," 서울대학교 대학원 전기공학과 공학 박사 학위 논문, 1993년 8월.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Semikron Inc., IGBT Data Book, 1991.
- 13) Jong W. Choi, Sung I. Yong and Seung K. Sul "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation," IEEE APEC, pp. 100~106, 1994.
- 14) B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives," from Prentice-Hall, 1986.