

## 영구자석형 교류전동기의 순시전력제한

윤경섭\*, 이치환\*\*, 황정환\*, 권우현\*

\*경북대학교, \*\*영남전문대학교

### Instantaneous Power Control of Permanent Magnet AC Motor

Youn K. S.\* , Lee C. H.\*\* , Hwang J. H.\* and Kwon W. H.\*

\*Kyungpook National University, \*\*Youngnam Collage

**Abstract :** Vector controlled PMAC(Permanent Magnet AC) motor, with rare-earth permanent magnet, are suitable for servo system demanding fast speed response. However, abrupt acceleration and deceleration control for fast response requires big instantaneous input power. So general PI control of PMAC motors can't be applied for limited power supply system like airplane or portable equipment because of input power fluctuation. Proposed technique to restrain instantaneous input power use variable power limit depends on airgap flux power. Stability check for proposed system is done.

#### I. 서 론

직류전동기는 계자전류와 전기자전류를 독립적으로 제어할 수 있으므로 위치 및 속도제어가 용이하고, 또한 토오크의 빠른 과도특성을 얻을 수 있어 정밀한 제어가 요구되는 구동장치에 주로 사용되어 왔다.[2] 그러나 직류전동기는 브러시의 사용으로 인해 구조적으로 복잡하고, 기계적 스위칭에 의한 브러시의 마모에 따른 정기적인 보수를 필요로 하는 단점이 있다.[1] 이에 반해 교류전동기는 브러시가 없어 구조적으로 간단하고 견고한 반면 비선형적인 특성이 있어 제어가 복잡해지는 단점이 있다.[4] 그러나 최근 제어기법의 발달로 교류전동기도 직류전동기에 못지않는 제어특성을 가지게 되었다. 특히 3상 영구자석형 동기전동기와 같은 구조에 백터제어기법을 이용 타여자식 직류전동기와 유사한 특성을 가진 영구자석형 교류전동기는 선형제어가 가능하고, 직류전동기의 단점을 보완 할 수 있게 되어 그 필요성이 증가되고 있다. 특히 영구자석형 교류전동기는 회전자 가 영구자석으로 되어있어 일정한 자속을 위한 자화전류가 필요하지 않기 때문에 고정자 전류는 토오크를 발생하는 데만 사용되므로 양률과 효율이 크다. 그중 회로류 자석은 자성이 강하고 특성이 좋아 손실이 거의 없으므로 동급의 다른 모터에 비해 소형화가 가능하다.[4] 하지만 가격이 비싼 것이 단점이므로 고효율과 소형화가 필수적인 항공기 및 전력이 제한된 이동용 시스템에 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 전력이 제한된 서보시스템에서 급격한 가감속

제이를 할 때 공급전력의 한계에 도달함으로써 생기는 전원부의 번동을 막기위한 전력제한을 한다. 하지만 이러한 전력제한을 함으로써 비선형적인 항이 들어가게 되므로 제어에 어려움이 따른다. 그러므로 일정전력한계 내에서는 선형적인 제어가 가능하도록 이러한 비선형적인 항을 제거하고, 전력한계밖에서만 비선형적인 항이 나타나게 한다. 이렇게 함으로써 순시전력제한뿐만이 아니라, 전동기제어에 일반적으로 많이 사용되는 비례적 분분이 설계기법을 사용하여 설계가 가능하도록 하였으며, 시스템의 안정도를 상세히 이용하여 증명하였다. 본 논문의 타당성을 보의실험 및 실험으로 입증하였다.

#### II. 본 론

영구자석형 교류전동기의 동기좌표계에서의 dq축 전압방정식은 다음과 같다.[2]

$$v_{q\alpha} = r_s i_{q\alpha} + p \lambda_{q\alpha} + \omega_r \lambda_{d\alpha} \quad (1)$$

$$v_{d\alpha} = r_s i_{d\alpha} + p \lambda_{d\alpha} - \omega_r \lambda_{q\alpha} \quad (2)$$

$$\lambda_{q\alpha} = L_q i_{q\alpha} \quad (3)$$

$$\lambda_{d\alpha} = L_d i_{d\alpha} + \lambda_m \quad (4)$$

여기서  $v_{q\alpha}$  : 고정자전압,  $i_{q\alpha}$  : 고정자전류,  $\lambda_{q\alpha}$  : 고정자자속,  $\omega_r$  : 회전자 회전속도,  $\lambda_m$  : 영구자석에 의한 상호자속,  $L_{q\alpha}$  : 인티던스,  $p$  : 미분연산자를 의미한다.

영구자석형 교류전동기의 dq축 좌표계에서의 토오크 방정식은 동기전동기의 토오크식

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_{d\alpha} i_{q\alpha} - \lambda_{q\alpha} i_{d\alpha}) \quad (5)$$

에 식 (3)과 (4)를 대입하여 얻을 수 있다. 여기서  $P$ 는 회전자극수를 말한다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)[\lambda_m i_{q\alpha} + (L_d - L_q)i_{q\alpha}i_{d\alpha}] \quad (6)$$

그리고 전기적인 토오크와 기계적인 회전자속도와의 관계식은 식 (7)과 같다.

$$T_e = J\left(\frac{2}{P}\right)p\omega_r + B_m\left(\frac{2}{P}\right)\omega_r + T_L \quad (7)$$

여기서  $J$  : 회전자관성,  $B_m$  : 접성마찰계수,  $T_L$  : 부하토크를 나타낸다.

영구자식이 회전자의 표면에 부착된 경우(Surface mounted type) 전동기 제작회사의 노력으로  $L_q \approx L_d$  가 되어 둘 출력효과를 무시할 수 있으며 식 (6)에서의 토오크식은 식 (8)과 같이 된다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)[\lambda_m i_{qs}] = K_t i_{qs} \quad (8)$$

여기서  $\lambda_m$ 은 영구자식에 의해 결정되는 상수이므로  $K_t = (3/2)(P/2)\lambda_m$ 으로 두면  $K_t$ 는 토오크 상수가 된다. 교류진동기는 진동기 고정자에 인가되는 3상전류를 동기좌표계로 변환한 후 토오크성분 전류  $i_{qs}$ 와 자속성분 전류  $i_{ds}$ 로 분리한 다음 타이자식 직류진동기와 같이 토오크와 자속을 독립적으로 제어할 수 있으며, 이때 영구자식형 회전자를 사용하는 경우  $i_{ds} = 0$ 으로 제어하면 인가된 전류는 토오크성분인  $q$ 상에만 나타나므로 단위전류당 최대 토오크를 얻을 수 있다. 이를 베터제이라고 하며, 이때는 비록  $L_q \neq L_d$  이더라도 토오크는 식 (8)과 같이  $i_{qs}$ 에 비례하는 성질을 가진다. 이는 직류진동기의 토오크특성과 같으므로 특성상 영구자식형 교류전동기를 BLDC(Brussless DC) 전동기라고도 한다.

진동기에 공급되는 전기에너지는 회전자지향에 의한 소모성분과 공극의 자계로 저장되는 에너지, 그리고 기계적인 출력에너지로 구분되어야 한다.

$$W_e = W_{loss} + W_{stored} + W_{mech} \quad (9)$$

여기서  $W_e$  : 공기에너지,  $W_{loss}$  : 고장자와 회전자지향에 의한 소모에너지,  $W_{stored}$  : 자계저장에너지,  $W_{mech}$  : 기계적 축력에너지 를 의미하며, 이 에너지의 변화분은 해당성분의 전력이 되므로 기계적 축력을 얻는 식 (10)과 같다.

$$P_{mech} = P_e - P_{loss} - P_{stored} \quad (10)$$

베터제이를 하면  $i_{ds} = 0$  이되고, 영구자식형 회전자의 회전자 전류는 거의 0이므로 각 전력은 다음과 같이 된다.

$$P_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(i_{qs}v_{qs} + i_{ds}v_{ds}) = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)i_{qs}v_{qs} \quad (11-1)$$

$$P_{loss} = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)i_{qs}^2 r_s \quad (11-2)$$

$$P_{stored} = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)i_{qs}^2 \lambda_m \quad (11-3)$$

$$P_{mech} = T_e \omega_r = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\lambda_m i_{qs} \omega_r = K_t i_{qs} \omega_r \quad (11-4)$$

일반적으로 많이 쓰이는 토오크 제어회로에서 공급되는 순시전력을 제한하기 위해서는 식 (10)에서와 같이 제한할 순시전력에서 소모분과 저장분을 뺀 값인 기계적 출력을 전력제한값인  $P_{lim}$ 로 하여 제한하면 된다. 식 (10)과 식 (11-4)에서와 같이 기계적 출력은 속도와 토오크의 곱이므로 속도에 따라서 전류를

$1/\omega_r$ 로 제어하면 일정출력을 얻을 수 있다. 이를 블럭도를 그려면 그림 1과 같다.

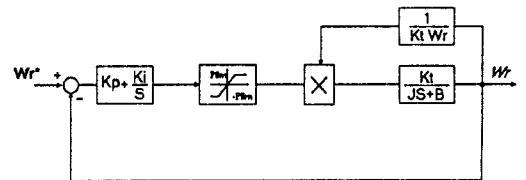


그림 1. 기계적 전력제한 블럭도

하지만 1차로 근사화된 전동기에 가해지는 제어신호가  $1/\omega_r$ , 향이 포함되는 비선형함수로 되므로,  $K_p$ 와  $K_i$ 를 결정할 수가 없게 된다. 그러므로 전력제한기 앞에  $\omega_r$ 을 곱하므로써 오차신호를 전력신호로 바꾸어 전력을 제한한 다음,  $1/\omega_r$ 을 곱하여 전류명령으로 바꾸어 전동기를 제어하는 블럭도는 그림2와 같다.

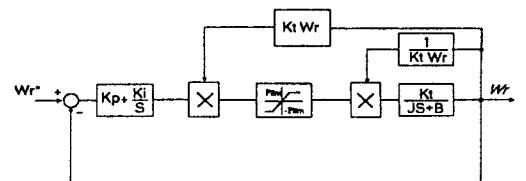


그림 2. 제안된 알고리즘에 의한 전력제한 블럭도

그림 2에서 전력제한값  $P_{lim}$ 내에서는  $\omega_r$ 과  $1/\omega_r$ 이 상쇄되어 단순 PI에 의한 토오크제어가 이루어지므로  $K_p$ 와  $K_i$ 를 일반적인 비례식분수 선형기법으로 결정할 수 있다. 그러므로 전력한 개인  $P_{lim}$ 로 인정전력 제어되는 경우는 비선형적인 일정전력운전을 행하다가 오차가 작아져  $P_{lim}$ 내로 들어오면 선형적인 비례적분제어기에 의해 제어되므로 응답시간이 조금 늦어지는 것 외에는 정상상태 및 오버슈트는 설계된 비례적분제어기와 같은 응답을 가진다. 하지만  $P_{lim}$ 를 상수로 주면 기계적 전력만 제한되고 순시전력은 제한되지 않으므로, 식 (10)에서 저항에 의한 손실지향은 다른 전력에 비해 충분히 작으므로 무시하고, 공극자계에 저장되는 전력은 가감속시 자계의 변화가 심하므로, 기계적인 전력제한 값은 순시전력제한 값에다 공극자계 전력을 뺀 값으로 순시적으로 변화시켜 주어야 한다.[5][6] 그러므로 제안된 시스템은 기변전력제한 값과 비선형적인 요소인  $\omega_r$ 이 들어가므로 안정도 판별이 필요하다.

### III. 안정도

전력제어 시스템의 안정도를 판별하기 위해 제어입력을 0으로 하고 비례적분제어기를 제거하면 그림2의 블럭도는 그림 3과 같이 되며, 이는 비선형 시스템으로 Nyquist나 Bode와 같은 선형적인 시스템에만 적용되는 안정도 판별법으로는 안정도를 판별할 수 없다.[3] 그러므로 전력제한구간과 제한전력 내의 구간으로 나누어 상태방정식을 구하면 다음과 같다.

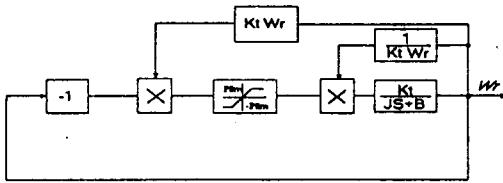


그림 3. 0입력 시스템 블록도

i) 전력제한 내의 구간( $-P_{lim} \leq -K_t \omega_r^2 \leq 0$ )

$$\dot{\omega}_r = -\frac{B+K_t}{J} \omega_r \quad (12)$$

ii) 전력제한구간( $-K_t \omega_r^2 < -P_{lim}$ )

$$\dot{\omega}_r = -\frac{B}{J} \omega_r - \frac{1}{J} \frac{P_{lim}}{\omega_r} \quad (13)$$

구간 (i),(ii)에서의 각 상태방정식 (12),(13)은  $K_t > 0$ ,  $P_{lim} > 0$  이므로  $\omega_r > 0$  일 때  $\dot{\omega}_r < 0$  이고  $\omega_r < 0$  일 때  $\dot{\omega}_r > 0$  이므로 이 시스템은 Lyapunov 함수를  $\omega_r^2/2$  으로 잡으면  $\dot{\omega}_r \omega_r < 0$  이므로 항상 안정하다. 식(12)(13)의 상 채직을 그러면 그림 4와 같이 0으로 수렴함을 알 수 있다.

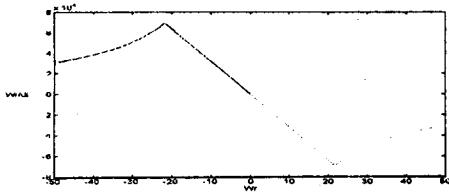


그림 4. 전력제한기 시스템의 상체적

#### IV. 모의실험

모의실험에 사용된 전동기 상수는 표 1과 같다.

표 1. 전동기 상수

정격 전력	2.2Kw
회전자 관성	$J = 0.000323 \text{ kgm}^2$
회전자 접성마찰계수	$B_m = 0.00143 \text{ Nm-s}$
극 수	P = 4
고정자 상저항	$R_s = 1.3\Omega$
고정자 인덕턴스	$L_s = 15\text{mH}$
회전자 자속	$\lambda_m = 0.262 \text{ V-s}$

식 (11-3)의 자계저장전력은 미분항을 가지고 있으므로 식 (1)을 이용하여 제거하면 식 (11-3)은 다음과 같이 된다.[7]

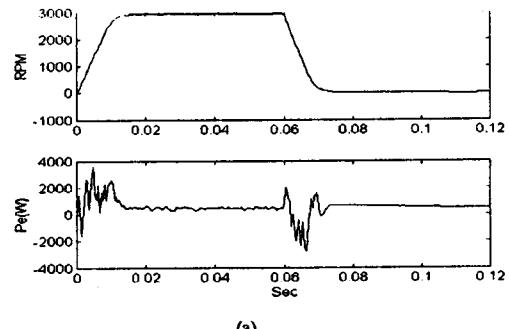
$$P_{stored} = \left(\frac{3}{2}\right) i_a(v_a - r_i a - \omega_r \lambda_m) \quad (14)$$

그림2의 블록도에서  $\omega_r = 0$ 이면 0/0꼴이 생겨 계산이 불가능하므로  $|\omega_r| < \epsilon$  때  $\omega_r$ 을 시스템에 영향을 미치지 않는 작은 값으로 대체하여 사용하였다. 식 (10)에 의해 기계적출력 제한값  $P_{lim}$ 은 제한할 순시전력 제한값  $P_{slim}$ 에서 식 (14)에 의

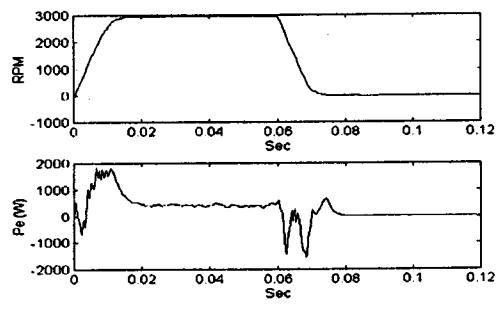
해 계산된 자계저장전력과 소모전력을 뺀값으로 순시적으로 변한다.

$$P_{lim} = P_{slim} - P_{loss} - P_{stored} \quad (15)$$

전동기 구동부는 CRPWM(Current Regulated Pulse Width Modulation)을 사용하였으며, 샘플링 시간은 실험에 사용된 것과 같은  $300\mu\text{s}$ 로하여 MATLAB을 이용 모의실험을 하였다. 그림 6은 3000 rpm의 속도명령에 대한 응답이며 순시전력은 1KHz의 저주파 이파기를 통과한 것이다. (a)는 전력제한없이 전동기 전류정격 6.4A의 제한기를 가지는 비례적분제어에 의한 응답이며, 순시전력이 2KW 까지 올라감을 볼 수 있다. 그림6의 (b)는 제안한 알고리즘이 의한 과정이며 순시전력이 1500W로 제한되고 있음을 알 수 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 지령된 속도명령에 도달하기 위해 허용된 최대의 전력으로 따라감을 볼 수 있다. 응답속도는 전력제한이 있는 비례적분제어보다는 느리지만 제한전력의 범위내에서는 최적으로 따라감을 알 수 있다.



(a)



(b)

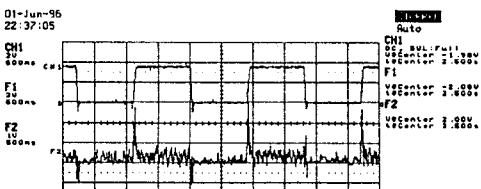
그림 6. 3000rpm 명령에 대한 속도응답 모의실험과정

(a) 비례적분제어, (b) 제안된 순시전력제한의 경우

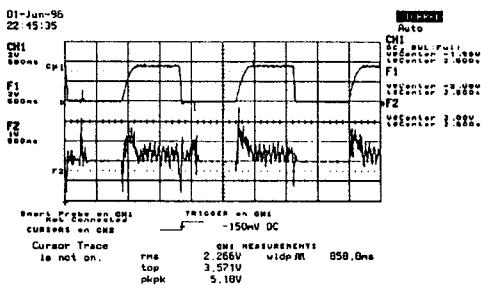
#### V. 실험

TMS320C30 마이크로 프로세서를 사용하여 실험하였으며, 전동기구동부는 히스테리시스를 이용한 CRPWM으로 구성되었으며, 샘플링 주파수는  $300\mu\text{s}$ 로 하였다. 그림7은 3000rpm 명령에 대한 속도응답을 보여주며 (a)는 단순 비례적분제어에 의한 응답으로 CH1이 속도를 나타내고 F2는 순시전력을 나타낸다. F2는 CH2의 신호를 저주파이파기를 통과한 신호이다. 실험과정에서도 모의

실험에서와 같이 속도응답이 느려지나 순시전력이 제한되고 있음을 볼 수 있다. 샘플링 시간을 작게하고, 정확한 저주파여파기만 사용한다면 조금 더 정확한 순시전력제어가 가능할 것이다.



(a)



(b)

그림 7. 3000rpm 명령에 대한 속도응답 실험파형

(a) 비례적분제어, (b) 제안된 순시전력제한의 경우

## VI. 결 론

전력이 제한된 서보시스템에서 가감속운전을 행함으로써 생기는 전원부의 변동을 막기위해서 일반적인 PI제어기 설계가 가능한 순시전력제한기를 제안하였으며, 비선형제어시스템을 상궤적에 의해 안정도를 판별하였다. 제안된 시스템은 모의실험과 실험에서 보인것과 같이 전력제한에 의한 응답시간의 지연을 제외한 과도응답은 전력제한이 없는 PI제어기의 특성과 거의 비슷함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. C. Kuo and Jacob Tal, *Incremental Motion Control DC Motors and Control Systems*, SRL Publishing, 1978.
- [2] Paul C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, 1987.
- [3] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, 1991.
- [4] Peter Vas, *Electrical Machines and Drives*, Oxford, 1992.
- [5] R. Krishnan and Praveen Vijayraghavan, "Parameter Compensation of Permanent Magnet Synchronous Machines Through Airgap Power Feedback," *IECON'95*, pp.411-416, 1995
- [6] Gilberto C. D. Sousa, Bimal K. Bose and John G. Cleland, "Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector-Controlled Induction Motor Drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, VOL. 42, NO. 2, pp. 192-198, April 1995
- [7] Yifan Tang and Longya Xu, "A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, VOL. 10, NO. 4, pp. 472-478, July 1995