

## 2차 보간법을 사용한 유도전동기 최대효율제어

(Maximum Efficiency Control of Induction Motor Drives  
Using Quadratic Interpolation Method)

신명호\*

(Myoung-Ho Shin)

### 요 약

3개의 자속에 대한 유도전동기의 입력을 계산한 후 3점을 2차 보간하여 2차 함수를 만들고, 입력이 최소가 되는 새로운 자속을 구한 후, 이 자속을 이용하여 다시 2차 보간하여 입력이 최소가 되는 자속을 구하는데, 새로운 점을 사용한 2차 보간을 수렴조건을 만족할 때까지 반복해서 입력이 최소가 되는 자속을 구하는 방법을 제안한다. 시뮬레이션 결과 최대효율제어를 위한 자속으로 신속한 수렴이 가능함을 보인다.

### Abstract

Three inputs of given three magnetic fluxes of an induction motor are calculated. Then, the calculation of magnetic flux for minimum input is repeated using quadratic interpolation method until the convergence criteria are satisfied. The maximum efficiency control is fulfilled with the final magnetic flux for minimum input. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Induction Motor, Fast Maximum Efficiency Control, Stator Flux-Oriented, Interpolation

### 1. 서 론

유도전동기의 최대효율제어를 위하여 전동기의 입력을 측정하고 자속을 정해진 양 만큼 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속을 찾는 방법은 전동기의 파라미터와 무관하며, 전동기의 입력만 알면 되는 장점이 있다. 그러나 효율이 최대가 되는 자속을 구하기 위해서는 시간이 많이 걸리는 단점이 있다

[1-4].

최대효율제어에서 수렴시간의 단축을 위하여 2001년에 참고문헌 [2]가 발표되었다. 이 논문에서 최대효율제어를 위한 자속을 찾기 위하여 Golden Section 방법을 사용하였으며, 최대효율제어를 위한 자속으로의 수렴시간을 단축시키는 효과를 얻었다.

참고문헌 [5]는 최대효율제어의 수렴시간을 단축시키기 위한 연구로서, 3개의 자속에서의 입력을 각각 계산한 후 3개의 점을 2차 보간하여 입력이 최소가 되는 자속을 찾고 이 값을 초기값으로 하여 미리 정해진 양 만큼 자속을 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속을 찾는 방법을 사용한다. 그러나 미리 정

\* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754

E-mail : mhshin@snu.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 28일

1차심사 : 2009년 6월 1일

심사완료 : 2009년 7월 2일

해진 양 만큼의 자속의 변화로 토크리플이 발생하는 문제가 존재한다. 또한 2차 보간을 위한 3개의 점을 찾기 위한 자속의 급격한 변화로 토크리플이 발생하는 문제가 존재한다.

본 논문에서는 유도전동기 최대효율제어의 수렴 시간을 단축시키기 위하여 참고문헌 [5]에서 제안한 방법의 문제를 해결하며, 참고문헌 [2]와는 다른 또 하나의 방법을 제안한다. 3개의 자속에 대한 유도전동기의 입력을 계산한 후 3점을 2차 보간하여 2차 함수를 만들고, 입력이 최소가 되는 새로운 자속을 구하는데, 새로운 점을 사용한 2차 보간을 수렴이 될 때까지 반복해서 입력이 최소가 되는 자속을 구한다. 또한 자속의 지령치를 저역통과필터를 통과시켜서 자속지령의 갑작스런 변화에 의한 토크리플을 저감한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증한다.

## 2. 고정자자속기준제어

그림 1은 제안한 최대효율제어방법을 갖는 고정자자속기준제어시스템을 나타내고 있다. 그림에서 첨자 \*는 변수의 지령치를 나타내며, ^는 추정된 값을 의미한다. 고정자자속의 크기와 변환각은  $\alpha$ - $\beta$  정직좌표계에서 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$|\hat{\lambda}_s| = \hat{\lambda}_{ds} = \sqrt{(\hat{\lambda}_{\alpha s}^2 + \hat{\lambda}_{\beta s}^2)} \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \frac{\hat{\lambda}_{\beta s}}{\hat{\lambda}_{\alpha s}} \quad (2)$$

d-q 회전좌표계에서 슬립속도 및 비간섭보상전류는 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$\omega_{sl} = \frac{(1 + \sigma\tau_r p)L_s i_{qs}^*}{\tau_r (\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds}^*)} \quad (3)$$

$$i_{dq} = \frac{\omega_{sl} \tau_r \sigma i_{qs}^*}{(1 + \sigma\tau_r p)} = \frac{i_{qs}^* \sigma L_s}{\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds}^*} \quad (4)$$

여기서,  $\tau_r = L_r/R_r$ ,  $L_r$  =회전자자기인덕턴스,  $R_r$  =회전자저항,  $\sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r)$ ,  $L_s$  =고정자자기인덕

턴스,  $L_m$  =자화인덕턴스,  $p = d/dt$ 는 미분연산자,  $i_{qs}$  =q축 고정자전류,  $i_{ds}$  =d축 고정자전류이다.

고정자자속은 식 (5)와 같이 역기전력을 적분하여 구한다.

$$\hat{\lambda}_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (5)$$

여기서  $v_s$ 와  $i_s$ 는 각각 정직좌표계에서의 고정자전압벡터와 고정자전류벡터이며,  $R_s$ 는 고정자저항이다.

토크는 식 (6)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{4} P_m \lambda_{ds} i_{qs} \quad (6)$$

여기서  $P_m$ 은 극수이다.

인버터 입력  $P_d$ 는 식 (7)과 같이 직류링크 전압  $V_{dc}$ 와 전류  $I_{dc}$ 의 곱으로 구한다.

$$P_d = V_{dc} I_{dc} \quad (7)$$

속도오차가 최대효율제어블록으로 입력되며, 최대효율제어블록에서 출력되는 자속의 지령이 저역통과필터(LPF)를 통과하고 있는 모습을 나타내고 있다.

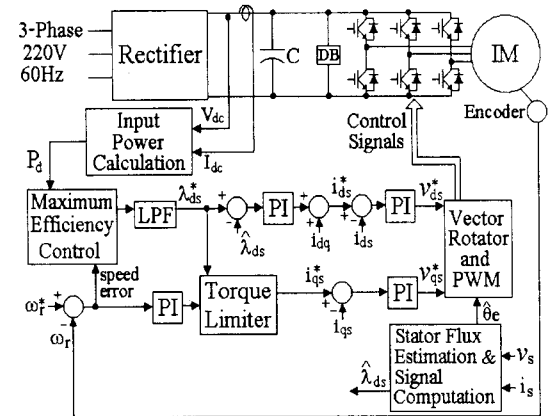


그림 1. 고정자자속기준벡터제어 블록도  
Fig. 1. Stator flux-oriented control drive system

### 3. 2차 보간법에 의한 최대효율제어

자속을 미리 정해진 양 만큼 변화시키면서 효율이 최대가 되는 점을 찾을 경우 자속의 변화로 토크리플이 발생하는 문제점이 존재한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 다음의 방법을 제안한다.

먼저 3개의 자속  $\lambda_{ds1}, \lambda_{ds2}, \lambda_{ds3}$ 에 대한 입력  $P_{d1}, P_{d2}, P_{d3}$ 를 측정하고, 측정된 3점을 이용하여 2차 함수를 만들면 식 (8)과 같으며, 2차 곡선의 최소가 되는 자속의 값  $\lambda_{min}$ 을 계산하면 식 (9)와 같다. 그림 2는 2차 보간된 곡선을 나타내고 있다.

$$P_d = a + b\lambda_{ds} + c\lambda_{ds}^2 \quad (8)$$

$$\lambda_{min} = -\frac{b}{2c} = \frac{P_{d1}(\lambda_{ds2}^2 - \lambda_{ds3}^2) + P_{d2}(\lambda_{ds3}^2 - \lambda_{ds1}^2) + P_{d3}(\lambda_{ds1}^2 - \lambda_{ds2}^2)}{2[P_{d1}(\lambda_{ds2} - \lambda_{ds3}) + P_{d2}(\lambda_{ds3} - \lambda_{ds1}) + P_{d3}(\lambda_{ds1} - \lambda_{ds2})]} \quad (9)$$

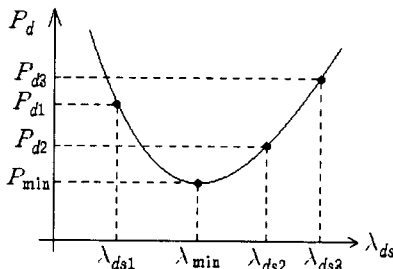


그림 2. 2차 보간  
Fig. 2. Quadratic interpolation method

그림 2의 2차 곡선은 유도전동기의 자속변화에 따른 입력곡선과 일치하지 않는 근사화 된 곡선이다. 따라서  $\lambda_{min}$ 은 입력이 최소가 되는 진정한 자속이라 할 수 없으므로 2차 보간으로 얻어진 자속을 이용하여 표 1에[6] 나타난 법칙에 따라서 다시 새로운 3개의 점을 선정하여 2차 보간을 시행한다. 이와 같은 2차 보간은 식 (10)의 수렴조건이 만족될 때까지 반복한다.

$$|\lambda_{min}(k) - \lambda_{min}(k-1)| < 0.008[\text{Wb}] \quad (10)$$

2차 보간으로 구한 자속  $\lambda_{min}(k)$ 가 이전에 구한 자속  $\lambda_{min}(k-1)$ 과의 차이가 정격자속의 2[%](0.008[Wb]) 보다 작으면 더 이상 보간을 시행하지 않는다.

2차 보간을 위한 자속 지령의 변화는 0.375[sec]의 주기로 이루어진다. 이 때 갑작스런 자속 지령의 변화로 토크리플이 발생할 수 있으므로 자속지령을 식 (11)의 저역통과필터를 통과시킨 후 자속제어기로 입력시킨다.

표 1. 재 보간을 위한 새로운 점 결정방법  
Table 1. Selection of new points for refitting

characteristics	new points for refitting	
	new	old
$\lambda_{min} < \lambda_{ds2}$ $P_{min} < P_{d2}$	$\lambda_{ds1} = \lambda_{ds1}$ $\lambda_{ds2} = \lambda_{min}$ $\lambda_{ds3} = \lambda_{ds2}$	
$\lambda_{min} < \lambda_{ds2}$ $P_{min} > P_{d2}$	$\lambda_{ds1} = \lambda_{min}$ $\lambda_{ds2} = \lambda_{ds2}$ $\lambda_{ds3} = \lambda_{ds3}$	
$\lambda_{min} > \lambda_{ds2}$ $P_{min} < P_{d2}$	$\lambda_{ds1} = \lambda_{ds2}$ $\lambda_{ds2} = \lambda_{min}$ $\lambda_{ds3} = \lambda_{ds3}$	
$\lambda_{min} > \lambda_{ds2}$ $P_{min} > P_{d2}$	$\lambda_{ds1} = \lambda_{ds1}$ $\lambda_{ds2} = \lambda_{ds2}$ $\lambda_{ds3} = \lambda_{min}$	

$$G(s) = \frac{30}{s+30} \quad (11)$$

정상상태로 운전하던 도중 과도상태를 만나면 자속 지령은 정격자속의 값(0.4[Wb])으로 즉시 바뀌어서 신속한 제어가 가능하도록 한다.

최대효율제어 알고리즘은 정상상태에 도달하면 수행되는데, 속도오차가 속도 지령의 2[%] 이내가 되면 정상상태에 도달한 것으로 판단하여 최대효율제어 알고리즘을 수행하도록 하였다.

### 4. 시뮬레이션 결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 ACSL을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전류제어주

기는 125[μs]이며, 속도제어주기 및 자속제어주기는 각각 1.25[ms]이다. 입력  $P_d$ 의 계산은 125[μs]의 주기로 수행되며, 저역통과필터(300/(s+300))를 통과시킨다. 전동기는 표 2의 3상 유도전동기를 사용하였다.

표 2. 유도전동기 파라미터  
Table 2. Induction Motor Parameters

3상, 3.7[kW], 4극 rated line current 18.95[A](peak), 1710[rpm]	
고정자저항	1.26[Ω]
회전자저항	0.21[Ω]
자화인덕턴스	50[mH]
고정자누설인덕턴스	4.7[mH]
회전자누설인덕턴스	4.7[mH]

그림 3은 자속의 변화에 따른 입력  $P_d$ 를 나타내고 있다. 속도는 1,600[rpm]이며 부하는 4.5[N·m]이다. 자속이 약 0.24[Wb]에서 입력이 약 1,059[W]의 값으로 최소가 된다.

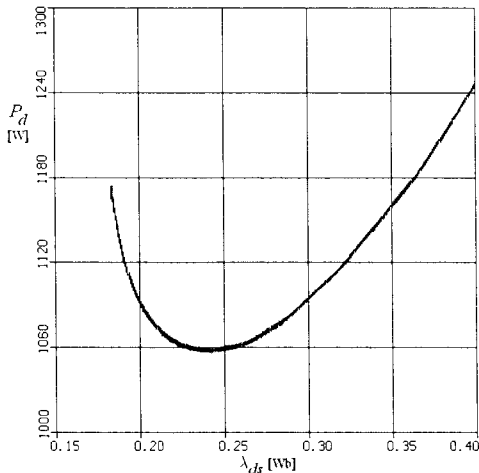


그림 3. 자속변화에 따른  $P_d$ (1,600(rpm), 부하 : 4.5(N·m))  
Fig. 3.  $P_d$  vs. flux(1,600(rpm), 4.5(N·m))

그림 4는 1,600[rpm], 부하 4.5[N·m]의 제안한 방법에 의한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 2차 보간을 위한 자속의 초기값은  $\lambda_{ds1}=0.24$ [Wb],  $\lambda_{ds2}=0.32$ [Wb],  $\lambda_{ds3}=0.4$ [Wb]이다. 이 점들로 2차 보간하여 0.21[Wb]의 자속이 구해졌다. 그 다음에 표 1의

재보간을 위한 방법을 적용하여 0.251[Wb]의 자속이 구해졌고, 같은 방법으로 0.242[Wb], 0.241[Wb]의 순으로 자속이 계산되었다. 0.242-0.241=0.001[Wb]가 되어서 식 (10)의 수렴조건을 만족하므로 최종자속은 0.241[Wb]가 되었다. 0.241[Wb]에서 입력  $P_d$ 는 약 1,058[W] 정도가 되어서, 그림 3의 최소입력 1,059[W]와 거의 일치하여 최대효율제어가 잘 수행되었음을 알 수 있다. 최대효율제어 알고리즘은 3초에 시작되어 5.25초에 최대효율점에 도달하게 된다. 토크는 진동 없이 거의 일정한 모습을 나타내고 있다.

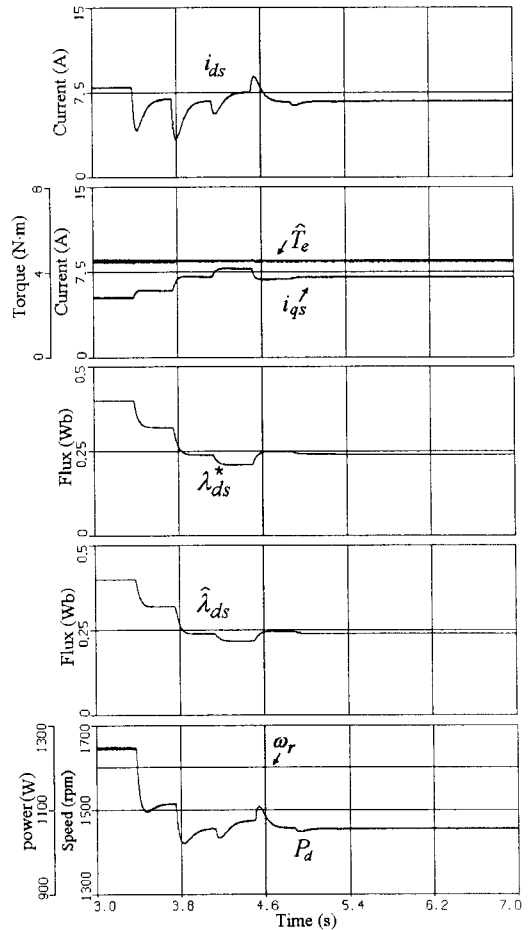


그림 4. 제안한 방법에 의한 최대효율제어결과 (1,600(rpm), 부하 : 4.5 (N·m))  
Fig. 4. Proposed maximum efficiency control (1,600(rpm), 4.5 (N·m))

## 2차 보간법을 사용한 유도전동기 최대효율제어

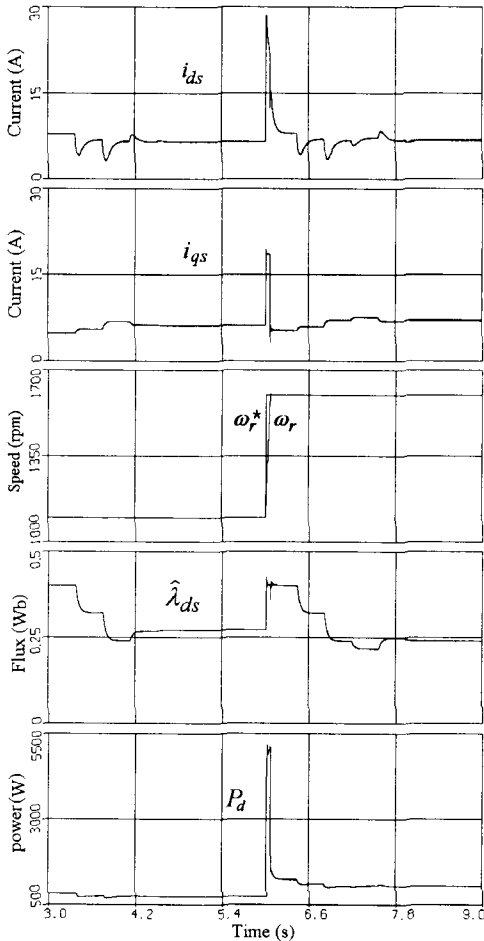


그림 5. 제안한 방법에 의한 최대효율제어 결과  
(1,100[rpm]→1,600[rpm], 부하 :  
4.5(N·m))

Fig. 5. Proposed maximum efficiency control  
(1,100[rpm]→1,600[rpm], 4.5(N·m))

그림 5는 부하 4.5[N·m]에서 속도지령을 1,100 [rpm]에서 1,600[rpm]으로 변경했을 경우의 결과를 나타내고 있다. 1,100[rpm]에서 첫 번째 보간의 결과는  $\lambda_{min}=0.267$ [Wb], 두 번째 보간의 결과는  $\lambda_{min}=0.2714$ [Wb]로 계산되어 오차가 0.008[Wb] 보다 작아서 정상상태 자속은 0.2714[Wb]가 되었다. 1,600 [rpm]에서  $\lambda_{min}$ 은 보간의 순서에 따라 0.2216, 0.2485, 0.2433[Wb]로 계산되어 세 번째 보간으로 최종자속이 구해졌다. 자속의 파형을 보면 속도지령의 증가에 따라 신속한 과도상태응답을 위하여 정격자

속 0.4[Wb]가 되었음을 알 수 있으며, 속도오차가 기준치 이하로 감소하면서 자동으로 최대효율제어 알고리즘이 시작되는 모습을 나타내고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서 유도전동기 고정자자속기준제어의 최대효율제어의 수렴시간을 감소시키기 위한 방법을 제안하였다. 3개의 주어진 자속에 대한 입력을 구한 후 오차범위 내로 수렴할 때까지 반복적으로 2차 보간을 실시하여 입력이 최소가 되는 자속을 구하였다. 또한 속도오차를 계산하여 속도오차가 기준치 이하가 되면 최대효율제어알고리즘을 자동으로 수행하도록 하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 방법의 타당성이 입증되었다.

## References

- [1] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, and J. G. Cleland, "Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive," IEEE Trans. on IE, vol.42, pp.192-198, 1995.
- [2] C.-M. Ta and Y. Hori, "Convergence improvement of efficiency optimization control of induction motor drives," IEEE Trans. on IA, vol.37, pp.1746-1753, 2001.
- [3] C. Chakraborty and Y. Hori, "Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives," IEEE Trans. on IA, vol.39, pp.1070-1076, 2003.
- [4] Myoung-Ho Shin, "Maximum efficiency control of a stator flux-oriented induction motor drive" Journal of KIIEE, vol. 20, no. 4, pp. 117-122, 2006.
- [5] Myoung-Ho Shin, "Improved Maximum Efficiency Control of a Stator Flux-Oriented Induction Motor Drive" Journal of KIIEE, vol. 22, no. 5, pp. 58-63, 2008.
- [6] S. S. Rao "Optimization: Theory and Applications," John Willy and Sons, pp.234-242, 1984.

## ◇ 저자소개 ◇

### 신명호 (申明昊)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 2002년 8월~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수.