

論 文
35~9~5

PLL 方式을 利用한 誘導電動機 高效率 運轉裝置의 簡略化에 관한 研究

Simplified High Efficiency Drive System of Induction Motor using PLL Technique

柳 喆 魯* · 李 公 熙** · 李 星 龍***
 (Chul-Ro Yu · Gong-Hee Lee · Seong-Ryong Lee)

Abstract

In this paper, the method to improve the efficiency of an induction motor at light load is discussed. Efficiency of induction motor can be very substantially improved by keeping the slip frequency as constant. Therefore, to simplify the control loop, algorithm which maintain constant slip frequency and control the input voltage is adopted. Simplified high efficiency drive of induction motor using PLL technique is suggested.

In order to verify the validity of this system, the test results are compared with those obtained by optimal slip drive system and then we found closer to the optimal efficiency. For example its efficiency is improved from 18[%] to 42[%] at a few fraction of the full load(20[%]).

1. 序 論

최근 誘導電動機 可變速 制御裝置의 급속한 발전으로 V/f 의 비를 일정하게 維持하여, 항상 큰 토크를 얻는 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 방식이 開發되었고, 이에 의한 可變速 制御는 여러 方面에 응용되고 있으며, 특히 정밀한 速度制御를 위하여 PLL System을 利用한 VVVF 制御가 일반화되었다.^{1)~3)}

그러나, 誘導電動機는 負荷率이 낮은 경우에는 效率이 떨어지는 短點이 있기 때문에, 産業電動力 應用分野의 80% 이상을 占有하고 있는 誘導電動機의 效率 改善은 에너지 節約을 위하여 중요한 問題로 부각되고 있다.⁴⁾⁵⁾ 따라서, 誘導電動機의 效率 向上을 위하여 슬립周波數를 最適效率 狀態

로 制御하는 방식의 연구가 進行되고 있으며, 이 방식은 각각의 速度와 負荷토크에 對應하는 最適슬립과 電壓을 연산하고 수행할 수 있는 프로세서가 필요하게 되어 시스템 構成이 어렵다는 短點이 있다.⁶⁾⁸⁾

本 論文에서는 制御系를 간소화하기 위하여, 速度 變化에 따라 最高效率을 維持하는 슬립周波數의 可變範圍가 좁음을 입증하고, 이에 따라 슬립周波數를 설정된 값으로 일정하게 維持함으로써 負荷變動時 電壓의 可變만으로 高效率 運轉이 가능한 알고리즘을 提示하였다. 또 速度制御能力이 우수한 PLL System을 適用하여 簡략하고 經濟적인 高效率 運轉裝置를 構成하였다.

2. 誘導電動機의 高效率 運轉 理論

誘導電動機의 出力토크 및 效率은 고정자에 공급되는 인버터 出力波形的 高調波에 의한 曠동토크의 영향을 무시하면 그림 1의 誘導電動機의 等價回路로부터 계산할 수 있다.

*正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 全州工專大 電氣科 助教授
 ***正 會 員 : 全北大 大學院 電氣工學科 博士課程
 接受日字 : 1986年 3月 25日

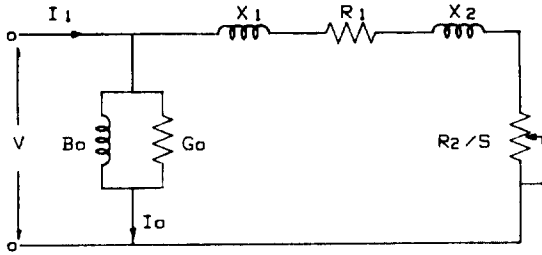


그림 1. 유도전동기의 근사 등가회로

Fig. 1. Approximate equivalent circuit of an induction motor.

따라서, 誘導電動機의 出力토크는

$$T = \frac{mp}{4\pi} \left(\frac{V}{f_s} \right)^2 \left(\frac{R_2/f_{se}}{(R_1/f_s + R_2/f_{se})^2 + 4\pi^2(L_1 + L_2)^2} \right) \quad (1)$$

(p : 극수, m : 상수, f_s : 고정자주파수, f_{se} : 슬립주파수, f_m : 회전자 회전주파수)

와 같고, 이때의 效率은

$$\eta = \frac{R_2(1/f_{se} - 1/f_s)}{[(R_1/f_s + R_2/f_{se})^2 + 4\pi^2(L_1 + L_2)^2]f_s G_0 + R_1/f_s + R_2/f_{se}} \quad (2)$$

과 같이 표시된다.⁵⁾ 식(2)에서 效率은 負荷의 크기에 관계없이 供給周波數 f_s 와 슬립周波數 f_{se} 의 函數임을 알 수 있고, 電動機 速度가 주어진 값으로 일정하게 維持된다면 f_m 이 일정하게 되므로 식(2)는 f_{se} 만의 函數로 된다. 이는 $d\eta/df_{se}=0$ 의 式으로부터 誘導電動機를 最高效率狀態로 運轉할 수 있는 最適슬립周波數를 계산할 수 있음을 의미한다.

그러나, 식(1)에서 보는 바와 같이 負荷 變動時 電動機의 出力토크를 負荷토크에 一致시키기 위해서는 슬립의 變化에 따라 入力電壓 V가 可變되어져야 하기 때문에 最適效率 運轉裝置를 構成하기 위해서는 각각의 速度와 負荷토크에 對應하는 最適슬립과 電壓을 연산하는 알고리즘이 필요하게 되므로 이 알고리즘을 수행할 수 있는 프로세서가 필요하게 되어 시스템 構成이 복잡하고 가격의 증대를 피할 수 없다.^{5),6)}

한편 誘導電動機를 最高效率狀態로 運轉할 수 있는 最適슬립周波數를 식(2)의 계산에 의하여 구한다는 것은 인버터出力의 高調波 성분과 誘導電動機의 非線型 特性 때문에 매우 어렵다.^{7),8)} 따라서 本 研究에서는 電動機의 入出力 및 인버터周波數를 직접 測定함으로써 最適슬립周波數를 구하였다. 實驗에 使用된 電動機는 4극, 1/4HP,

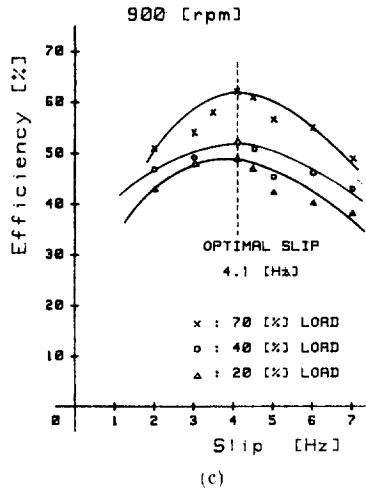
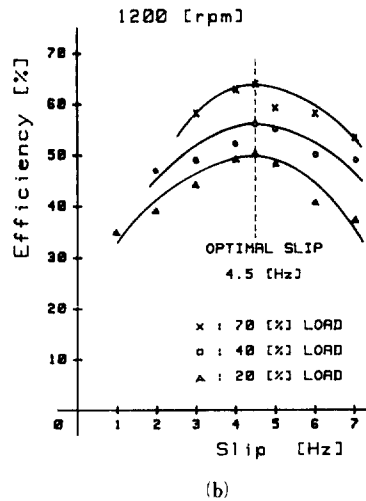
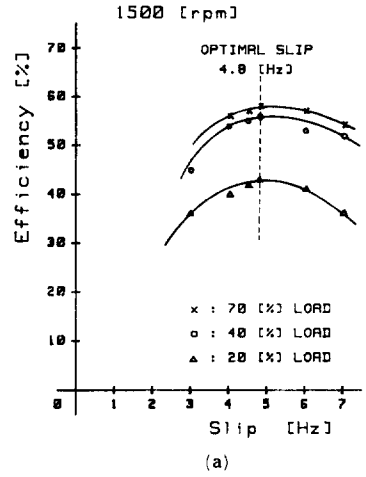


그림 2. 슬립주파수에 대한 效率의 變化
Fig. 2. Efficiency curve with slip frequency.

전부하 슬립 7%인 三相誘導電動機이고 120W, 1A의 直流他勵發電機가 直結되어 있다.

그림 2는 슬립周波數에 따른 效率(DC發電機出力/인버터 DC入力)의 變化를 測定한 것이다. 그림 2에서 最高效率를 나타내는 最適 슬립周波數는 電動機 速度에 따라 變化됨을 알 수 있다. 즉 電動機 速度가 1500[rpm]일 때 最適 슬립周波數는 4.8[Hz]이고, 1200[rpm]일 때는 4.5[Hz], 900[rpm]일 때는 4.1[Hz]이다. 여기서 電動機의 速度變化에 따른 最適 슬립周波數 可變範圍가 0.7[Hz] 정도로 좁기 때문에 制御 알고리즘을 간단하게 하기 위하여 슬립周波數를 4.5[Hz]로 일정하게 하였고 이에 의한 效率의 차이는 표 1에서와 같이 미소(1~2%)하다.

따라서, 슬립周波數를 일정(4.5[Hz])하게 維持시켜도 負荷變動에 따른 入力電壓의 可變만으로 高效率 運轉이 가능함을 알 수 있다.

표 1. 슬립에 따른 효율의 비교

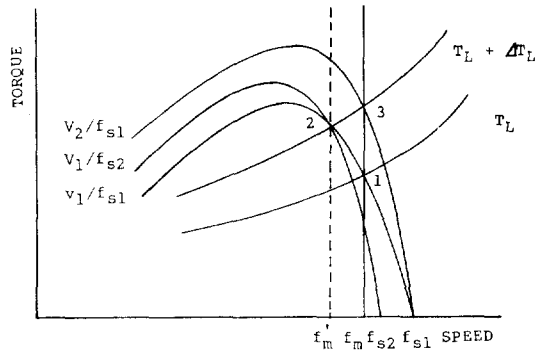
Table 1. Comparison of efficiency with slip.

속도 [rpm]	최적슬립 [Hz]	부하 [%]	효율(%)		비고
			최적슬립 운전시	일정슬립 운전시	
1500	4.8	20	44	42	-2
		40	56	55	-1
		70	58	57	-1
1200	4.5	20	50	50	0
		40	56	56	0
		70	64	64	0
900	4.1	20	48.3	47	-1.3
		40	53.2	51	-1.2
		70	62	51	-1

3. 高效率 運轉裝置의 簡略化

誘導電動機를 電動機 速度 및 負荷變動에 따라 最高效率狀態로 運轉하기 위해서는 식(1), (2)에 의하여 슬립周波數 f_{se} 와 入力電壓 V 를 同時に 最適狀態로 變化시켜야 한다.

그러나 표 1에서 電動機의 速度에 따라 最高效率를 나타내는 슬립周波數의 變化範圍가 좁기 때문에 最適슬립周波數를 選定하여 일정하게 維持하여도 高效率狀態로 運轉됨을 알 수 있다. 따라서 負荷토크에 따라 入力電壓만을 可變시키는 간단한 알고리즘으로 기존의 高效率 運轉裝置보다 시스템을 簡略化 할 수 있다.

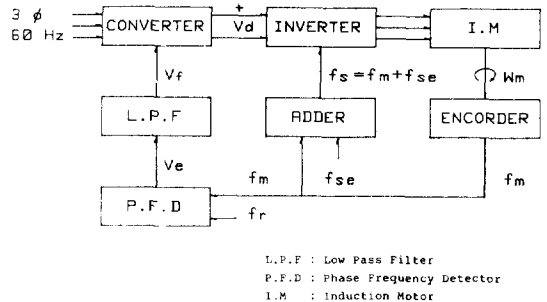


$$f_s = f_{se} + f_m$$

$$f_{se} = f_{s1} - f_m = f_{s2} - f_m'$$

그림 3. 일정 슬립에 의한 속도-토크 곡선상의 추이
Fig. 3. Developed torque-speed curve by constant slip (f_{se}).

이 알고리즘에 의한 速度-토크 곡선상의 추이를 그림 3에 나타냈다. 처음 負荷토크 T_L 狀態에서 슬립周波數 f_{se} 인 高效率 狀態로 運轉(동작점 ①)되고 있다가 負荷가 ΔT_L 만큼 增加하면 동작점이 ①에서 ②로 移動하게 된다. 여기서 슬립周波數 f_{se} 는 일정하게 維持시켰기 때문에 電動機速度가 f_m 에서 f_m' 로 감소한 만큼 고정자 入力周波數 f_s 가 f_{s1} 에서 f_{s2} 로 감소하게 된다. 電動機速度를 f_m 으로 維持시켜 주기 위하여 入力電壓 V_1 을 V_2 로 增加시켜주면 동작점은 ②에서 ③으로 移動하고, 고정자 入力周波數는 f_{s2} 에서 f_{s1} 으로 돌아오게 된다. 즉 슬립周波數 f_{se} 를 고정시킴으로써 V_1/f_{s1} 의 高效率 狀態에서 負荷가 ΔT_L 만큼 增加하면 V_2/f_{s1} 의 狀態로 다시 高效率 狀態를 維持한다. 이는 電動機 速度 f_m 을 일정하게 制御해 주는 간단



L.P.F : Low Pass Filter
P.F.D : Phase Frequency Detector
I.M : Induction Motor

그림 4. 간략화된 고효율 운전장치의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of simplified high efficiency drive system.

한 시스템 구성만으로도 高効率 運轉이 가능함을 의미한다. 이상의 알고리즘에 의하여 構成한 시스템의 블록선도를 그림 4에 나타냈다.

이는 슬립周波數 f_{se} 와 電動機 速度周波數 f_m 을 가산기에 의하여 더한 周波數 f_s 를 電動機의 供給周波數로 하는 裝置이므로 電動機의 速度變化에 관계없이 적정슬립周波數 f_{se} 는 일정하게 維持되어 負荷變動에 따라 電動機 速度만 一致시켜 주면 된다. 여기서 負荷에 따른 속도를 보상해 주기 위하여 기준속도 f_r 과 電動機 速度 f_m 의 오차를 이미 우수한 速度制御 能力을 갖고 있는 PLL System⁹을 利用하여 완전 보상함으로써 電動機 速度를 負荷에 관계없이 일정하게 維持시킬 수 있다.

따라서 電動機 速度 및 負荷 變動에 따라 이에 對應하는 最適슬립과 전압을 연산하여 제어해주는 프로세서가 必要 없게되어 기존의 마이크로 프로세서에 의한 高効率 運轉裝置에 비하여 PLL System만으로 그림 4와 같이 간단하게 高効率 運轉裝置의 構成이 가능하다.

4. 實驗 및 結果 檢討

그림 4에 提示한 高効率 運轉裝置로 實驗한 結果를 그림 5~7에 나타냈다. 그림 5는 無負荷에서 負荷를 30%增加시켰을 때 시스템의 電動機 速度 및 低域通過필터(LPF)의 應答波形이다. 이것은 본 高効率 制御가 負荷도오크에 關係없이 電動機 速度를 일정하게 維持시킬 수 있음을 보여준다.

그림 6은 電動機가 900[rpm], 20[%] 負荷일 때 보통의 정격상태로 運轉하다가 S점에서 高効率 制御 알고리즘을 適用했을 때 出力의 變化없이 入力이 29.8[%] 감소함을 보여준다.

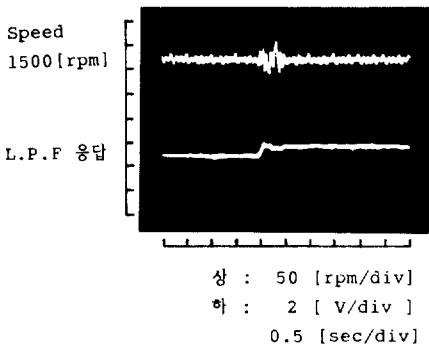


그림5. 부하변동시 계통의 응답
Fig.5. System responses with load variation.

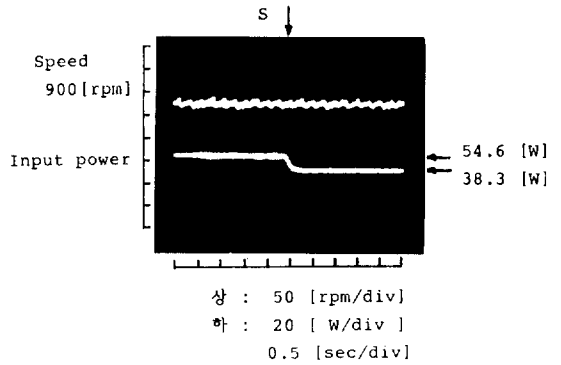


그림 6. 속도와 입력의 파형
Fig. 6. Waveforms of speed and input power.

그림 7(a)(b)(c)는 負荷에 따라 V/f의 比를 일정하게 運轉했을 때의 効率과 슬립周波數를 4.5(Hz)로 일정하게 維持하였을 때의 効率을 測定하여 비교한 것이다. 이는 각각의 速度에 따라 本研究에서 提示한 高効率 運轉裝置의 効率改善 效果를 보여준다. 이 效果를 표 2에 나타냈다. 이상의 結果를 살펴보면 본 實驗裝置가 最適効率 運轉裝置에 비하여 표 1에서 보는 바와 같이 效率의 차이가 미소(1~2%)하기 때문에 슬립을 일정하게 維持시켜 運轉하여도 誘導電動機는 高効率 狀態로 運轉됨을 알 수 있다. 따라서 電動機 各各의 速度와 負荷의 變化에 따른 最適슬립과 電壓을 연산하는 알고리즘 및 프로세서가 필요없이 간단하게 制御系를 구성할 수 있다.

표 2. 본 방식에 의한 효율 개선 효과
Table 2. Improvement of efficiency by authored method.

속도 [rpm]	부하 [%]	V/F의비일정운전		본 방식		효율개선 [%]
		효율[%]	역률	효율[%]	역률	
1500	20	18	0.7	42	0.89	24
	40	38	0.84	55	0.92	17
	70	50	0.92	57	0.92	7
1200	20	28	0.73	49	0.87	21
	40	38	0.78	58	0.87	20
	70	59	0.85	64	0.88	5
900	20	33	0.73	47	0.81	14
	40	49	0.73	51	0.82	2
	70	50	0.79	61	0.85	11

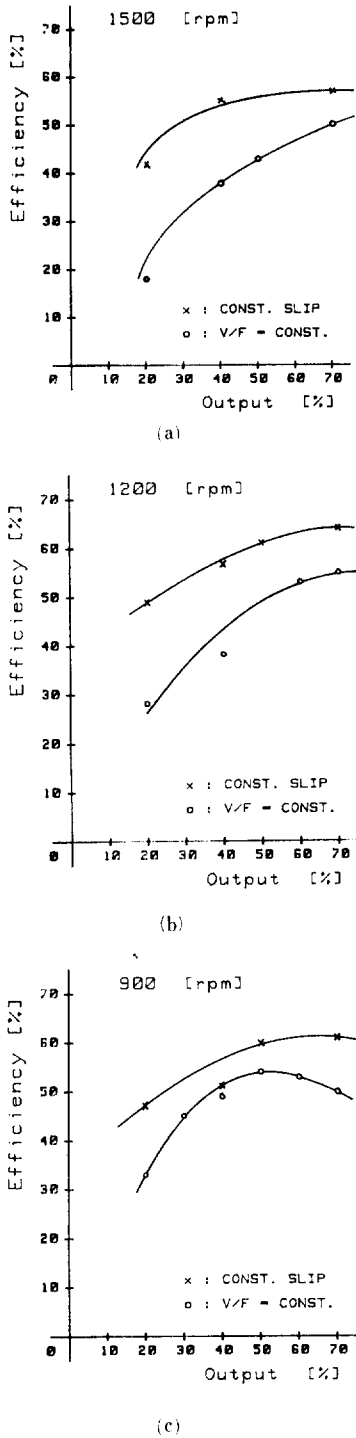


그림7.본 방식에 의한 효율 개선 효과
Fig.7.Improvement of efficiency by authored method.

5. 結 論

슬립周波數를 일정한 周波數(4.5[Hz])로 維持시키고 PLL System을 利用하여 入力電壓만을 制御하는 알고리즘으로 高效率 運轉裝置를 簡略화할 수 있는 方法을 提示하였다.

實驗결과 誘導電動機가 最大效率를 나타내는 슬립周波數는 電動機의 速度變化에 따라 變化하지만 그 範圍가 좁고(0.7[Hz]), 本 방식에 의한 效率이 最適狀態의 效率과 미소(1~2[%])한 차이임을 알 수 있었다. 따라서 本 研究에서 提示한 高效率 運轉裝置는

1. 電動機 速度 및 負荷變動에 따라 最適슬립을 산정하는 알고리즘 및 프로세서가 必要없어 制御系가 簡便해지고,
2. 改善된 PLL制御系에 의하여 負荷變動에 관계없이 定速 運轉이 可能하며,
3. V/f의 比를 一定하게 運轉했을 때보다 效率를 2~24%까지 改善할 수 있었다.

그러므로 本 방식은 誘導電動機를 高效率로 運轉하면서 광범위한 速度制御가 요구되는 곳에 적합하다고 생각한다.

앞으로 電動機를 最適狀態로 運轉하기 위하여 電力變換裝置 使用에 의한 交流 電源측에의 영향 및 出力측의 高調波를 감소시키는 문제와 精密, 高應答制御를 실현하기 위한 電動機 定數 變化에 關해 받지 않는 制御系를 構成하는 방식에 대하여 계속 연구하고자 한다.

참 고 문 헌

- 1) Vithal V. Athani and Sudgir M. Deshapande, "Microprocessor Control of a Three-phase Inverter in Induction Motor Speed Control System", IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-27, pp.291-298, 1980.
- 2) R. Moffat, P.Sen, R. Younker, and M.M. Boyomi, "Digital Phase Locked Loop for Induction Motor Speed Control", IEEE Trans.Ind. Appl., Vol. IA-15, pp.176-182, Mar/apr., 1979.
- 3) M. Mittal and N. U. Ahmed, "Time Domain Modeling and Digital Simulation of Variable-frequency AC Motor Speed Control Using PLL Technique", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-19, No. 2, Mar./Apr. 1983.
- 4) N. Mohan, "Improvement in Efficiency of Induc-

- tion Motor by Means of Voltage Control”, IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, pp. 1466-1471, July/Aug.1980.
- 5) 박민호, 설승기, 김홍근, 정승기, “슬립제환에 의한 유도전동기의 최적효율운전에 관한 연구”, 대한전기학회지, Vol. 32, No. 3, Mar., 1983.
 - 6) Min Ho Park and Seung Ki Sul, , “Optimal Efficiency Drive of Induction Motor with Current Source Inverter”, IPEC-83, Vol. 1, pp.450-460, Mar., 1983.
 - 7) E. A. Klingshirn and H. E. Jordan, “Poly-phase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources”, IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-87, No. 3, pp. 624-631, Mar., 1968.
 - 8) K. Venkatesan and James F. Lindsay, “Comparative Study of the Losses in Voltage and Current Source Inverter Fed Induction motors”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-18, No. 3, pp. 240-246, May/June, 1982.
 - 9) 정연택, 이성룡, “3상 유도전동기의 속도제어를 위한 PLL System 개선에 관한 연구”, 대한전기학회지, Vol. 30, No. 12, Dec., 1981.
 - 10) S. A. Nasar and J. B. Scott, “Time Domain Formulation of the Dynamics of Induction Motors”, Int. J. Elect. Eng. Educ., Vol. 11, pp. 36-44, 1973.