

誘導電動機의 線形化制御 特性

윤병도* 김민희** 정재훈***
 *중앙대학교 **영남공업전문대학 ***유한공업전문대학

Linearized Control Characteristics of Induction Motor

Byung-Do, Yoon* Min-Haei, Kim** Jea-Yoon, Chung***

* Chung-Ang Univ. **Yeung-Nam Tech. Coll. ***Yoo-Han Tech. Coll

Abstrat

The purpose of the paper is to operate a high-dynamic-performance for ac servo system. It is describes a characteristics and stability regions by linearized control system of squarri-el-cage induction motor. Designed control system are compose to slip-frequency vector control for controlled a scandary interlinked flux by PWM inverter.

I. 序 論

最近 電力用半導체素子와 電力變換技術向上으로 産業의 自動化에 Robot 나 數值制御機器等的의 Servo System에 直流電動機가 主로使用되어 왔으나, 構造上問題점으로 運轉에 制約이 따르게되어 AC電動機를 使用하여 Servo System에 適用하는 可變速高性能制御技術에 대한 研究가 많이 이루어지고있다. (1),(2),(3)

특히 능型誘導電動機는 Vector制御를 採用함으로써 構造上長點을 利用하여 容量이 큰 Servo 系通에서 高速応答運轉特性에 飛躍的인 向上을가져와 直流電動機와 같은 性能을 滿足시킬수 있도록되었다.(4) 誘導電動機를 高速応答이 要求되는 Servo 系通에 適用하려면 Torque指令變化에代應하여 1次電流의 時間的遲延없이 線形的으로 制御할수있는 裝置가 要求되지만 2次누洩 Reactance影響 등으로 非線形的으로되어 過渡狀態에서 信賴性이 떨어지게 되므로 系統의 高速応答과 安定度, 過負荷耐量等を 贈大시키기 위하여 電動機傳達函數 線形化와 過負荷 Torque에서 安定度가 要求되므로,(5) 른 研究에서는 誘導電動機의 d-q속의 電壓, 電流方程式으로부터 誘導된 狀態方程式과 出力方程式을 使用하여 入力條件에따라 現代制御理論을 導入한 誘導電動機 傳達函數線形化制御理論을 基初로 2次鎖校자束을 一定하게 制御하는 Slip周波數型 Vector 制御 System을 構成하여, 系統의 安定度向上과 高速応答特性에 대하여 考察하고 이結果를 大容量誘導電動機를 使用하여 精密하고 高速応答特性이 要求되는 産業用位置制御系通에 適用하고자한다.

II. 誘導電動機의 傳達函數 線形化 制御理論

(1) 出力方程式

유도전동기의 전압방정식은 고정자(Stator)을 기준으로한 d-q 변환에서 표시하면 식 (1)이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+PLs & 0 & PM & 0 \\ 0 & R_s+PLs & 0 & PM \\ PM & pWcM & R_r+PLr & pWcLr \\ -pWcM & PM & -pWcLr & R_r+PLr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

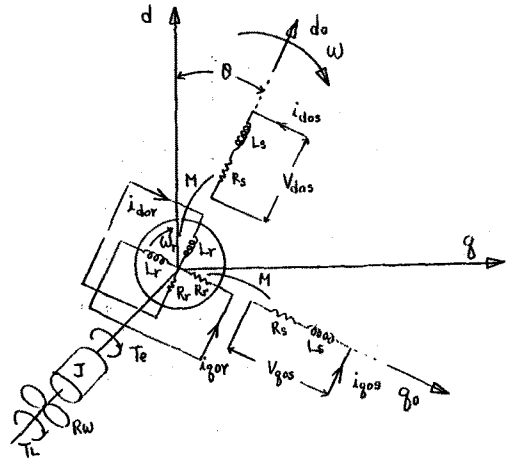


Fig. 1 do-q0 Model of Induction Motor

(1) 식을 전압, 전류의 진폭과 각주파수의 함수로 나타내기 위하여 각주파수 W로 회전하는 do-q0속으로 변환하면 식(2)가 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} V_{dos} \\ V_{qos} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s+PLs & -WLs & PM & -WM \\ WLs & R_s+PLs & WM & PM \\ 0 & PM & -(W-pWc)M & R_r+PLr \\ 0 & (W-pWc)M & PM & (W-pWc)Lr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dos} \\ i_{qos} \\ i_{dor} \\ i_{qor} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 식의 전압, 전류방정식은 비선형이므로 전류에 대하여 다시 정리하면 식(3)으로 되며, 이때 Torque는 식(4)로 표시된다.

$$P \begin{Bmatrix} idos \\ iqos \\ idor \\ iqor \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Rs/OLs & W+pWr M^2/OLsLr & RrM/OLsLr \\ -W-pWr M^2/OLsLr & -Rs/OLs & -pWr M/OLs \\ RsM/OLsLr & -pWr M/OLr & -Rr/OLr \\ pWr M/OLr & RsM/OLsLr & -W+pWr/O \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} M iqos + Lr iqor = Xqor = 0 \\ W = pWr + Rr iqos/Lr idos \end{Bmatrix} \quad (13) \quad (14)$$

$$* \begin{Bmatrix} pWr M/OLs \\ RrM/OLsLr \\ W-pWr/O \\ -Rr/OLr \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} idos \\ iqos \\ idor \\ iqor \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1/OLs & 0 \\ 0 & 1/OLs \\ -M/OLsLr & 0 \\ 0 & -M/OLsLr \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} Vdos \\ Vqos \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$Te = pM(iqos idor - idos iqor) \quad (4)$$

여기서 0 는 누설계수(=1-M²/LsLr) 이다. 식 (3),(4)은 W 혹은 Wr을 포함하고 있으며, (4) 식은 idos 와 idor와의 곱과, iqos 와 idor의 곱을 포함하고 있으므로 이식들은 일반적으로 비선형적이다. 유도전동기의 상태방정식 (3)식, 출력방정식 (4)식이 선형으로 되기 위해서는 W 와 Wr가 포함되어있는 항의 idos 와 idor가 일정한 값의 정수로 되면 선형화 될수있다. 유도전동기의 2차 전류는 Torque을 발생하지 않은 상태에서는 0이 되므로 idor가 일정한 값으로 되기 위해서는 0이 되어야 한다. 그러므로 유도전동기가 선형 상태로 되기 위해서는 (7)식과 (8)식이 성립되어야 한다.

$$idos = Idos = K \text{ (정수)} \quad (7)$$

$$idor = 0 \quad (8)$$

(7) 식과 (8)식을 (3),(4) 식에 대입하면 선형상태 방정식인 (9)식과, 선형출력방정식인 (10)이 유도된다.

$$P \begin{Bmatrix} iqos \\ iqor \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -RS/OLs & RrM/OLsLr \\ RsM/OLsLr & -Rr/OLr \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} iqos \\ iqor \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{Bmatrix} -Idos \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} -pM^2 Idos/OLsLr & 1/OLs \\ pM Idos/OLr & -M/OLsLr \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} W \\ Wr \\ Vqos \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$Te = -pM Idos iqor \quad (10)$$

(2) 線形化 安定狀態條件.

(3) 식을 Vdos에 대하여 정리하면 식(12)가 유도되며,

$$Vdos = (Rs+PLs)idos-WLsiqos+PMidor-WMiqor \quad (12)$$

(7),(8) 식을 (2)식에 대입하면 (13) 식이 얻어지며, (13)식을 (2)식에 대입하면 (14) 식이유도된다.

그러므로 W 는 Wr, iqos, idos을 검출하여 식(14)에서 구할수있으며, 이값을 식(12)에 대입하면 Vdor은 식(17)로 된다.

$$Vdos = (Rs+PLs)idos - WOLs iqos \quad (17)$$

이 Vdos는 idos을 일정하게 제어하는것을 조건으로 W, idos 와 iqos을 검출하면 (18)식이유도된다.

$$Vdos = RsIdos*-WOLsiqos+K(Idos*-idos) \quad (18)$$

여기서 Idos* 는 do축 1차 전류지령으로 일정하며 K 는 비례계수로 (7), (8) 식을 안정하게 만들기 위한 것이다. W 을 식(14), Vdos을 식(18)에서 얻어지며 식(7),(8) 이 성립될때 안정도를판단하기 위하여 (14),(18)식을 (3)식에 대입하여 정리하면 (19)식이 되며, 이식은 비선형방정식이므로 평형점 근방에서 미소분에 의하여 선형화로 해석할수있다. 평형점은 (19) 에서 P=0 로 되는점은 식(20),(21),(22)으로 표시된다. 여기서 첨자(o) 는 평형상태를 나타낸것이며, 평형점이 안정되면 W 를 (14) 식, Vqos를 (18) 식에서 얻었을때 (7),(8) 식을 만족시킬수 있으며, 이것의 안정을 조사하기 위하여 평형점근방에서 상태방정식은 식(23)으로 표시되며, 이때특성방정식은 식(24)로 되며 계수 A0,A1,A2,A3 를 Routh 판별법에 의하여 계통이 안정되도록 K 값을 결정하면 평형점에서 과도안정상태를 증가할수 있을것이다.

$$P \begin{Bmatrix} M(idos-Idos*) \\ Lr idor \\ Xqor \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Rs+K/OLs & RrM^2/OLsLr^2 \\ Rs+K/OLs & -Rr/OLr \\ 0 & -Rr iqos/Lr idos \end{Bmatrix} *$$

$$* \begin{Bmatrix} pWrM^2/OLsLr \\ -pWrM^2/OLsLr+Rriqos/Lridos \\ -Rr/Lr \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} M(idos-Idos*) \\ Lr idor \\ Xqor \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$idoso - Idos* = 0 \quad (20)$$

$$idoro = 0 \quad (21)$$

$$Xqoro = 0 \quad (22)$$

$$P \begin{Bmatrix} M \Delta idos \\ Lr \Delta idor \\ \Delta Xqor \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Rs+K/OLs & (Rr/OLs)*(M^2/LsLr) \\ Rs+K/OLs & -Rr/OLr \\ 0 & -Rr/Lr*iqoso/Idos* \end{Bmatrix} *$$

$$* \begin{Bmatrix} pWrM^2/OLsLr \\ -pWrM^2/OLsLr+(Rr/Lr)(iqoso/idos*) \\ -Rr/Lr \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} M \Delta iqos \\ Lr \Delta idor \\ \Delta Xqor \end{Bmatrix} \quad (23)$$

$$A0S^3 + A1S^2 + A2S + A3 = 0 \quad (24)$$

(3) 線形狀態時 出力方程式과 傳達函數.

선형상태시의 상태방정식 (7),(8)식의 idos을 Idos로 치환하여 식(9)에 대입하면 식(25)가 얻어지며, 이때 출력방정식도 (26) 식으로 표시된다. 유도전동기의 기계계에 의한 상태방정식 (운동방정식)은 식(27)로 되며,

$$P \begin{bmatrix} iqos \\ wr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Rs/OLs + Rr/OLr & -pIdos/O \\ pM^2 Idos/LrJ & -RW/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iqos \\ wr \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/OLs & 0 \\ 0 & -1/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vgos \\ TL \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$Te = P(M^2/Lr)Idos iqos \quad (26)$$

$$PWr = (-Rw Wr)/J + (Te - TL)/J \quad (27)$$

선형상태에서 유도전동기의 전기계와 기계계를 포함한 상태방정식은 (25),(26),(27)을 정리하면 (28)식으로 유도된다.

$$P \begin{bmatrix} iqos \\ wr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Rs/OLs - Rr/OLr & -pIdos/O \\ pM^2 Idos/LrJ & -RW/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iqos \\ wr \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/OLs & 0 \\ 0 & -1/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vgos \\ TL \end{bmatrix} \quad (28)$$

선형상태에서 유도전동기의 Block 선도는 (28) 식에 의하여 Fig.2 와 같이 되며, 이때 전달함수는 식 (29)식과 같이 2차 형태로 된다.

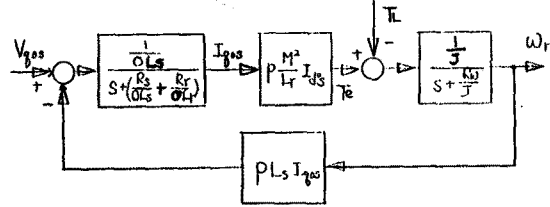


Fig.2 Linearized Block Diagram of a Induction Motor

$$Wn(S) = Wr(s)/Vgos(S) = (1/pLs Idos) * Wn^2 / (S^2 + 2ZWnS + Wn^2) \quad (29)$$

선형화 제어한 유도전동기의 Block 선도나 식(29)의 전달함수는 타령자 직류전동기의 근사한 형태로 표시되었으며, 이것은 유도전동기도 직류전동기의 전기자전류와 자속제어를 하는 것과 같은 제어특성을 나타내는 것이다. (6)

(4) 자속과 Idos와의 關係

공극의 자속은 do속과 qo속상에 만들어지며 do속의 공극자속 Xdog와 qo속의 공극자속 Xdog는 (34) 식으로 표시되다

$$Xdog = M(Idos + idor) = M Idos \quad (34)$$

$$Xr = Xdog \quad (37)$$

큰 torque을 발생할때 Xg는 Xdog보다 약간 증가하게 되는데 이것은 직류전동기의 전기자 반작용에 의한 자속증가분으로 간주되며, 2차 최고자속 Xr은 do속상에서는 do속상 2차권선에 전류가 흐르지 않으므로 Xdog와 같게되며, qo속상은 do속상 2차권선의 qo속상 1차권선에 의한 속도기전력과의 합이 0이 되므로 (37) 식으로 되고, 무부하상태 (iqos=0)에는 공극자속 Xg는 M Idos로 유도전동기 무부하 전류의 정격값으로 설정할 수 있다. (5)

III. 線形化 理論에 의한 制御回路 構成.

최근 Digital 제어회로의 진보에 따라 Microprocessor를 응용하여 Soft적으로 구성되어 제어하는 경우가 많이 연구되어지고 있으나, (7)

응답속도와 Sampling 주기에 따라 제어계의 주파수 응답에 의한 차단주파수의 정도에서 Sampling 주기를 수 msec 이하로 하여야 함으로 용량이 큰 Servo System에서 적용이 어렵게 되므로 11KW의 유도전동기로 고속응답특성이 요구되는 Screen Printer 용에 적용하고자 Fig.3 과 같이 Analog적으로 구성하였다.

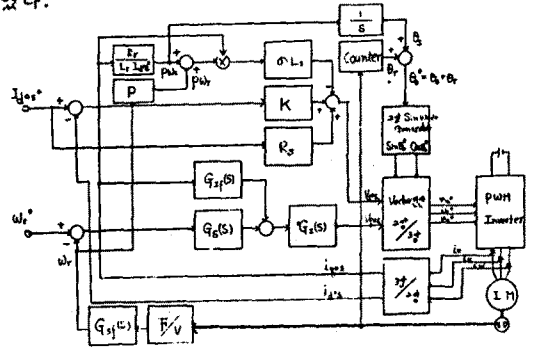


Fig.3 Block Diagram of Linearized Control Circuits

IV. Simulation 結果

농형유도전동기의 전달함수 선형화제어이론과 이것을 기초로 하여 구성된 제어회로에 의하여 고속 응답성과 안정도를 알아보기 위하여 2.2KW 농형유도전동기를 사용하여 Digital Simulation한 결과는 다음과 같으며, 이때 전동기의 정수값은 출력 = 2.2KW, 전압 = 140V, 전류 = 15A, 회전수 = 1800rpm, 극수 = 4극, 주파수 = 60Hz, Rs = 0.358, Rr = 0.327, Ls = 0.0527H, Lr = 0.0527, M = 0.0494, O = 0.121, p = 3, J = 0.012(Kg.m^2), Idos = 7.2A, Wn = 127, Z = 0.440 이다.

(1) 安定度에 따른 K의 決定.

선형화 안정상태조건에서 Idos* = iqos, iqos = 0을

만족하기 위하여 V_{dos} 는 식(18)에 포함되어있는 K 을 결정하여야 하며, 계통이 선형화되고, 넓은 제어범위에서 안정되게 동작하려면 (24) 식의 특성 방정식을 안정영역에서 동작되도록 A_0, A_1, A_2, A_3 의 계수를 결정하면된다. Simulation 결과는 Fig. 4로 되었으며, K 의 값에따라 안정도 범위가 넓어짐을 알수있다. 여기서는 유도전동기의 과도상태에서 특성항상이 요구되어지므로 정격속도의 $\pm 120(\%)$, 정격Torque의 $\pm 500(\%)$ 에서도 안정하게 동작되도록 $K=15$ 로 결정하였다.

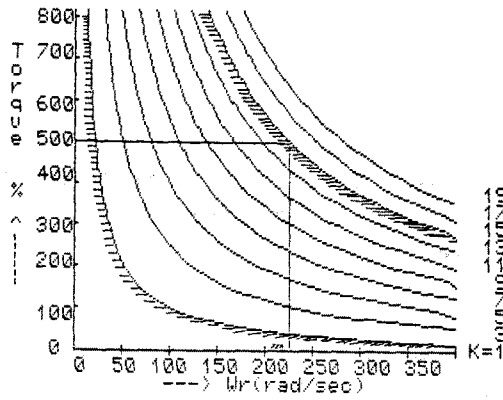


Fig.4 Operating Characteristics of Over Torque - Speed at versus K

(3) 周波數応答.

유도전동기의 전달함수 선형화제어이론을 적용하여 유도한 (29)식에서 V_{qos} 을 입력, ω_r 을 출력으로 하였을때, 주파수응답을 Bode 선도로 나타낸것이다.

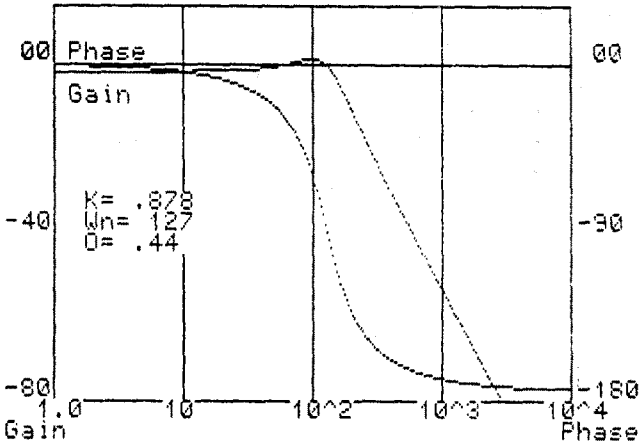


Fig.5. Bode Diagram of Linearized Induction Motor.

V. 結 論

誘導電動機의 傳達函數 線形化制御理論에 의하여 do 축 1次電流가 一定하고 2次電流가 0가되도록 do 축 1次電壓의 크기와 do-qr 角周波數을 1次電流의 函數에의해서 制御되는 System 구성에서, 誘導電動機의 傳達函數는 安全하게 線形化시킬수있으며, qr 축 1차전압 과 發生 Torque 사이의 傳達函數는 1次系로되고, qr축電壓과 回轉子角周波數사이의 傳達函數는 2次系로된다. 이 制御系通에서 安定係數 $K(=15)$ 값의 決定에따라 폭넓은 速度 制御 範圍와 過負荷 Torque시 安定狀態에서 動作 範圍를 擴大시킬수있으며, 大容量高速応答特性이 요구되는 Servo System 에 크게 應用될것으로 사료 된다.

參 考 文 獻

- (1) Hidehiko Sugimoto et al., " Speed Sensor Vector of Induction Motor With Model Reference Adaptive System ", IEEE - IASAM, 1987
- (2) Toshiaki Murata et al., " A New Approach for Constructing a Vector - Oriented Control Theory by State Space Method ", IECON - 87
- (3) Tsugutoshi Ohtani, " A New Method of Torque Control free From Motor Parameter Variation In Induction Motor Drives IEEE - IASAM, 1987
- (4) 杉本英彦, " 低慣性誘導電動機의 高速応答制御 ", 三陵電機技報, Vol.58, No.2, 1984
- (5) 中野博民, " 2 次巻線饋入자束를 着目한 誘導電動機의 新의 等價回路와 定數決定法 ", JIEE, Vol.3, No. 3, 1984
- (6) Hidehiko Sugimoto et al., " A High Performance Induction Motor Drive System ", IECON '84 PP833 ~ 838, 1984
- (7) Nobuyoshi Mutoh et al., " High - Response Digital Speed - Control System For Induction Motors ", IEEE - Trans. IE - 33, NO.1, 1986
- (8) 杉本英彦, " 大容量誘導電動機의 高性能制御法 ", JIEE, Vol.107, No.2, 1987