2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

새로운 슬라이딩 평면과 궤환 선형화를 이용한 유도 전동기의 슬라이딩 모드 제어

박승규, 안호균, 김형문
창원대학교 전기공학과 제어 및 전력전자 실험실

Sliding Mode Control with the feedback linearization and novel sliding surface for induction motors

Seung-Kyu Park, Ho-Kyun Ahn, Hyung-Moon Kim
Control and Power electronic Lab. Changwon national univ.

Abstract - In this paper, feedback linearization and the sliding mode control(SMC) are used together for uncertain nonlinear system. An advantage of feedback linearization technique is to make linear control theories can be used for nonlinear system and the SMC have the robustness. But the dynamics of the SMC has the dynamics lower order than that of the original system. Therefore the linear control theory can not be used with the SMC. The novel sliding surface of the SMC can have the dynamics of the nominal non linear system controlled by the feedback linearization. The proposed method can be used for the control of induction motors.

1. 서 론

궤환 선형화 이론은 비선형 계통을 비선형 좌표변환과 비선형 피이드백을 이용하여 정확한 선형화를 가능케 함으로써 이미 많은 연구가 되어 있는 선형제어이론을 그대로 도입하여 사용할 수 있다는 커다란 장점을 가지고 있다[1]. 또한, 슬라이딩 모드 제어 이론은 파라메터 불확실성이나 외란이 존재하는 경우에 강인한 특성을 가지는 제어이론으로 많은 연구가 이미 이루어져 있는 상태이며 실제로 많은 응용결과를 가지고 있는 이론이다[3]. 그러므로 본 연구에서는 궤환 선형화와 슬라이딩 모드 제어이론의 장점을 함께 이용하여 다입력 계통에 적용하는 연구방향을 제시하기로 한다. 하지만, 슬라이딩 모드 제어 이론은 근본적으로 입력 떨림현상과 슬라이딩 평면으로의 도달기간이 존재한다는 단점을 가지고 있으며 슬라이딩 평면이 제어대상 계통보다 (다입력 계통인 경우) 입력의 개수만큼 적은 동특성을 가지기 때문에 다른 제어기법과 같이 결합하여 사용하기가 매우 어렵다는 특성을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 이러한 단점을 제거하기 위하여 입력의 개수만큼 가상의 상태를 도입하였고 가상의 상태의 동특성이 추가된 차수가 증가된 계통에 대해서 슬라이딩 평면을 구성하여 슬라이딩 모드 제어이론을 적용하였다. 결과적으로 새롭게 구성된 슬라이딩 평면을 제어대상계통의 동특성을 가질 수 있게 되었고 궤환 선형화 이론에 의해 제어된 계통의 동특성을 가질 수 있게되었다. 또한 가상의 상태를 도입하는 과정에서 초기의 가상의 상태값을 초기 슬라이딩 함수의 값이 영이 되도록 함으로써 도달기간을 제거할 수 있게 되었다. 제안된 방법은 유도 전동기의 제어에 적용될 수 있음을 보인다.

2. 본 론

2.1 다입력 계통에서 Sliding Mode Control

다음과 같은 불확실성을 포함하는 다중입력을 갖는 n차 계통을 고려한다.

$$\dot{x}(t) = (A+\Delta A)x(t) + (B+\Delta B)u(t) + Df(t) \qquad (1)$$

여기서 $\mathbf{x}\in\mathbf{R}^n$ 은 상태, $\mathbf{u}\in\mathbf{R}^m$ 은 입력, $\mathbf{f}\in\mathbf{R}^r$ 은 노옴유계를 가지는 외란이고, $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$와 외란행렬 D는 다음의 정합조건(Matching Condition)을 만족한다.

$$rank([\mathbf{B} : \Delta\mathbf{A} : \Delta\mathbf{B} : \mathbf{D}]) = rank\mathbf{B} \qquad (2)$$

$$\Delta\mathbf{A}\mathbf{x}(t) = \mathbf{B}\Delta\mathbf{A}_1\mathbf{x}(t)$$
$$\Delta\mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \mathbf{B}\Delta\mathbf{B}_1\mathbf{u}(t)$$
$$\mathbf{D}\mathbf{f}(t) = \mathbf{B}\mathbf{D}_1\mathbf{f}(t) \qquad (3)$$

기존의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의된다 [2].

$$S_i = \{x \mid S_i = C_i x(t) = 0\},\ (i = 0, \ldots, m) \qquad (4)$$

여기서 $C_i = [c_{i1}, \ldots, c_{in}]$이고, $c_{i1}, \ldots, c_{in}$는 슬라이딩 모드의 동특성이 안정하도록 선택된다.

전체적인 슬라이딩 평면은 각각의 슬라이딩 평면의 교차평면으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_e = \{x \mid S = Cx(t) = 0\} = S_1 \cap S_2 \cap \ldots S_m \qquad (5)$$

n-차의 원래계통에 대해 위의 슬라이딩 평면은 (n-m)차의 동특성을 가진다. 도달평면 문제는 $\mathbf{x(t)}$의 초기치가 슬라이딩 평면 위에 있지 않으면, 즉 $\mathbf{S(x)}$의 초기치가 영이 아닌 경우에 생기는 문제이다. 슬라이딩 모드를 보장하는 조건은 다음과 같다[4].

$$S^T(x)\,\dot{S}(x) < 0 \qquad (6)$$

본 논문에서 해결하고자 하는 문제는 다음과 같다.

가상 상태를 도입하여 슬라이딩 평면을 구성함으로써 슬라이딩 모드가 원래 계통의 동특성을 가지도록 하여 궤환 선형화와 결합된 형태의 제어기를 구성하는 것이 가능하도록 한다. 도달기간 문제를 해결한다.

2.2. 다입력 계통에서 새로운 슬라이딩 평면을 가지는 Sliding Mode Control

새로운 슬라이딩 평면은 원래의 계통에 가상상태들을 추가하여 차수가 증가된 계통을 가지고 정의한다. 가상상태들은 공칭계통의 가제어 표준형으로부터 정의된다.[6]

다음은 상태변환 $\mathbf{z}=\mathbf{P}\mathbf{x}$ 에 의해 식(1)으로부터 구해진 가제어 표준형이다. 여기서 $\mathbf{P}$는 가제어 표준형으로의 변환행렬이다.

$$\dot{z}(t) = A_c z(t) + B_c u(t) + B_c h(t) \qquad (7)$$

여기서

$$A_C = \left[\begin{array}{cccc|cccc|c|cccc}
0 & 1 & 0\cdots & 0 & 0 & 0 & 0\cdots & 0 & & 0 & 0 & 0\cdots 0 & 0 \\
0 & 0 & 1\cdots & 0 & 0 & 0 & 0\cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0\cdots 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
-\alpha_{11} & -\alpha_{12} & \cdots & & & \cdots & & & & \cdots & & -\alpha_{1(n-1)} & -\alpha_{1n} \\ \hline
0 & 0 & 0\cdots & 0 & 0 & 1 & 0\cdots & 0 & & 0 & 0 & 0\cdots 0 & 0 \\
0 & 0 & 0\cdots & 0 & 0 & 0 & 1\cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0\cdots 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
-\alpha_{21} & -\alpha_{22} & \cdots & & & \cdots & & & & \cdots & & -\alpha_{2(n-1)} & -\alpha_{2n} \\ \hline
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \hline
0 & 0 & 0\cdots & 0 & 0 & 0 & 0\cdots & 0 & & 0 & 1 & 0\cdots 0 & 0 \\
0 & 0 & 0\cdots & 0 & 0 & 0 & 0\cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1\cdots 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
-\alpha_{m1} & -\alpha_{m2} & \cdots & & & \cdots & & & & \cdots & & -\alpha_{m(n-1)} & -\alpha_{mn}
\end{array}\right]
\begin{array}{l} \left.\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\}\mu_1 \\ \left.\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\}\mu_2 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}
\Bigg\} n
\qquad
B_C = \left[\begin{array}{ccc}
0 & 0\cdots & 0 \\
0 & 0\cdots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
1 & 0\cdots & 0 \\ \hline
0 & 0\cdots & 0 \\
0 & 0\cdots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 1\cdots & 0 \\ \hline
\vdots & \vdots & \vdots \\ \hline
0 & 0\cdots & 0 \\
0 & 0\cdots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0\cdots & 1
\end{array}\right]
\begin{array}{l} \left.\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\}\mu_1 \\ \left.\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\}\mu_2 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}
\Bigg\} n$$

새로이 정의될 가상상태는 공칭계통을 기초로 하여 정의되기 때문에 위의 계통에 대한 공칭계통을 살펴보면 다음과 같다.

$$\dot{z}_o(t) = A_c z_o(t) + B_c u_o(z_o, t) \tag{8}$$

여기서 $u_0(z_0, t)$는 공칭 제어입력으로 시간에 대한 미분이 가능하다고 가정한다.

가상의 상태를 정의하기 위한 예비단계로서 공칭가상상태를 다음과 같이 정의한다.

공칭가상상태 $z_{ov} = \begin{bmatrix} z_{ov1} \\ z_{ov2} \\ \vdots \\ z_{ovm} \end{bmatrix}$는 식(8)에서 입력 항이 존재하는 상태방정식의 상태 $\begin{bmatrix} z_{o\mu_1} \\ z_{o\mu_2} \\ \vdots \\ z_{o\mu_m} \end{bmatrix}m$ 들의 미분으로 정의하며 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{z}_{ov}(t) = [\ A_3 P \ \ A_4] \begin{bmatrix} x \\ z_{ov} \end{bmatrix} + g(x_o, t) \tag{9}$$

여기서

$\dot{u}_o(x_o, t)$ 는 다음과 같이 $g(x_o, t)$ 로 정의한다.

$$g(x_o, t) = \dot{u}_o(x_o, t) \tag{10}$$

식(10)과 같이 정의하는 이유는 공칭상태를 실제상태로 대치하여 공칭가상상태로부터 가상상태를 정의하게 되는데 이 과정에서 불확실성의 개입을 없애기 위함이다.

이제 식(9)에서 공칭 상태인 x_o를 실제상태 x로 대치함으로써 새로운 가상상태 z_v를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{z}_v(t) = [\ A_3 P \ \ A_4] \begin{bmatrix} x \\ z_v \end{bmatrix} + g(x, t) \tag{11}$$

이렇게 정의하는 이유는 다음에 새롭게 정의하게 되는 슬라이딩 평면을 정의하고 그 슬라이딩 평면이 공칭계통의 동특성을 갖도록 하기 위함이다.

새로운 슬라이딩 평면을 정의하기 위하여 새로운 가상상태를 가지고 차수가 증가된 계통을 다음과 같이 구성하였다.

$$\dot{x}_e(t) = (A_e + \Delta A_e) x_e(t) + (B_e + \Delta B_e) u(t) + B_d g(x_e, t) + D_e f(t) \tag{12}$$

여기서

$$\mathbf{x}_e(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z}_v \end{bmatrix},\ \mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_3\mathbf{P} & \mathbf{A}_4 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{D}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\Delta\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \Delta\mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

위의 차수가 증가된 계통에 대해 새로운 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{S} = [\mathbf{C}_1\mathbf{P} \ \ \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z}_v \end{bmatrix} - \mathbf{u}_o(\mathbf{x}, t) = \mathbf{C}\mathbf{x}_e - \mathbf{u}_o(\mathbf{x}, t) \tag{13}$$

여기서

$$C_1 = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1(n-1)} & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \cdots & \alpha_{2(n-1)} & \alpha_{2n} \\ & \vdots & & \\ \alpha_{m1} & \cdots & \alpha_{m(n-1)} & \alpha_{mn} \end{bmatrix}.$$

위와 같이 슬라이딩 평면을 정의하는 이유는 위에서도 언급하였듯이 새롭게 정의된 슬라이딩 평면의 동특성이 공칭계통의 동특성을 갖도록 하기 위해서이다.

2.3. 비선형 시스템의 궤환 선형화

본 논문에서는 다음과 같은 불확실성이 존재하지 않는 공칭계통에 대해서 궤환 선형화 이론을 적용시킨다.

$$\dot{x}_0(t) = a(x_0) + B(x_0) u_0 \tag{14}$$

여기서 f와 g 는 R^n 내에 있는 개집합(open set) U 위의 연속미분 가능한 원활한 벡터장(C^∞ vector field)이고, $f(0) = 0, x \in R^n, u \in R$ 이라고 가정한다. 식(14)와 같은 비선형 계통이 주어졌을 때, 비선형 좌표변환 $z = T(x)$ $(T : R^n \to R^n)$와 비선형 궤환 $u = \alpha(x) + \beta(x)$ $(\alpha, \beta : R^n \to R)$을 통하여 비선형 계통을 새로운 좌표계에서 다음과 같은 선형 계통(15)으로 변환하는 것을 궤환 선형화 기법이라고 한다.

$$\dot{z}_0 = A z_0 + b v_0 \tag{15}$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}.$

(A, b)는 Brunovsky 표준형 쌍이고, v_o는 새로운 좌표계에서의 제어입력이다. Brunovsky 표준형 쌍 (A, b)는 가제어한 선형계통이나 행렬 A가 원점에 n개의 고유치를 가지는 불안정한 계통이므로 새로운 좌표계에서 전체계통을 안정화시키기 위해서는 상태 궤환 입력을 인가한다.

$$v_0 = K z_0 \tag{16}$$

여기서 K는 상태궤환 이득이다.

계통 (14)에 궤환 선형화 기법을 적용하여 선형계통 (15)으로의 변환이 가능할 조건은 참고문헌[1]을 참조하면 된다.

본 논문에서의 해결해야할 문제는 다음과 같다.

불확실한 비선형 계통을 가상 상태를 추가한 새로운 SMC를 이용하여 궤환 선형화 이론을 적용한 공칭계통의 제어특성과 같도록 한다. 즉 불확실한 비선형 계통에 대하여 SMC를 이용하여 나타난 제어성능과 계통 (14)에 궤환선형화를 이용하여 나타난 제어성능과 같도록 한다. 이 문제점이 해결되기 위해서는 도달기간 문제는 부수적으로 해결되어야 한다.

2.4 궤환 선형화에 의한 새로운 슬라이딩 평면 구성

본 장에서는 궤환선형화에 의해 제어된 공칭계통의 동특성을 가질 수 있는 슬라이딩 평면을 구성하고 그것을 이용하여 SMC입력을 구성함으로써 2장에서 언급한 문제를 해결하기로 한다. 우선 다음과 같은 공칭 상태에 대한 가상의 상태를 정의한다.

$$z_{0v} = \dot{z}_{0n} = K z_0 \tag{17}$$

위의 식을 미분하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\dot{z}_{0v} = K\ \dot{z}_0 = K \begin{bmatrix} z_{02} \\ z_{03} \\ \vdots \\ z_{0v} \end{bmatrix} \tag{18}$$

위의 식을 근거로 하여 다음과 같은 가상의 상태를 정의한다.

$$\dot{z}_v = K \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_v \end{bmatrix} \tag{19}$$

가상의 상태가 추가된 차수가 증가된 계통은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x) u(t) + v(x, t) \tag{20}$$

$$\dot{z}_v = K(Az + bKz)$$

위 계통에 대하여 슬라이딩 평면은 다음과 같이 구성한다.

$$s(z, z_v) = z_v - Kz \tag{21}$$

가상상태의 초기치를 다음과 같이 선택하면 슬라이딩 함수의 초기치가 영이되어 도달기간을 제거할 수 있다.

$$z_v(t_0) = Kz(t_0) = 0 \tag{22}$$

여기서 다음과 같은 정리를 얻을 수 있다.

정리 1. 새로운 슬라이딩 평면(21) $s(z, z_v)$은 궤환 선형화 기

법을 적용하여 제어되는 식(14)과 같은 동특성을 갖는다.

정리 1의 증명은 참조 논문[6]으로부터 얻을 수 있다.
정리 1과 SMC이론으로 부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

정리 2. SMC 입력 $u(t)$가 슬라이딩 모드 평면 $s(z, z_v)$ 상에 상태들이 있도록 하면 상태 $x(t)$는 $u_o(x, t)$에 의해서 제어되는 공칭 시스템의 궤적을 따른다.

증명) 이것은 정리1과 SMC 이론에 의해 자명하다.

2.5 다입력 비선형 시스템(유도 전동기)에 적용

본 논문에서는 3개의 멀티 입력을 가진 유도 전동기에 대해서 살펴 보기로 한다.
그에 대한 동특성 방정식[5]은 다음과 같다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + d(t)$$

여기서,

$$x = [\, i_{ds} \ \ i_{qs} \ \ \varphi_{ds} \ \ \varphi_{qs} \,]^T \quad u = [\, v_{ds} \ \ v_{qs} \ \ w_s \,]^T$$

$$f = \begin{bmatrix} -(\alpha+\beta) & 0 & \dfrac{\beta}{\Lambda_s} & \dfrac{w}{\sigma\Lambda_s} \\ 0 & -(\alpha+\beta) & -\dfrac{w}{\sigma\Lambda_s} & \dfrac{\beta}{\Lambda_s} \\ -\alpha\sigma\Lambda_s & 0 & 0 & w \\ 0 & -\alpha\sigma\Lambda_s & -w & 0 \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\alpha\Lambda_s} & 0 & x_2 \\ 0 & \dfrac{1}{\sigma\Lambda_s} & -x_1 \\ 1 & 0 & x_4 \\ 0 & 1 & -x_3 \end{bmatrix}$$

$$\| d(t) \| < V_{MAX}$$

불확실성이 존재하지 않는 경우 궤환 선형화 기법을 이용하여 선형화 시키기 위한 비선형 좌표 변환은 다음과 같다.[5]

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}[(x_3 - \sigma\Lambda_s x_1)^2 + (x_4 - \sigma\Lambda_s x_2)^2] \\ h(x) \\ x_3x_2 - x_4x_1 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$h(x) = (x_1x_3 + x_2x_4)(\beta\sigma^2\Lambda_s + \beta\sigma\Lambda_s) - \beta(\sigma\Lambda_s)^2(x_1^2 + x_2^2) - \beta\sigma(x_3^2 + x_4^2)$$

결과적으로 아래의 Brunovsky표준형으로 선형화 된다.

$$\dot{z}_0 = \begin{bmatrix} 0&1&0&0 \\ 0&0&0&0 \\ 0&0&0&0 \\ 0&0&0&0 \end{bmatrix} z_0 + \begin{bmatrix} 0&0&0 \\ 1&0&0 \\ 0&1&0 \\ 0&0&1 \end{bmatrix} v_0$$

선형화된 계통의 고유치가 원하는 위치에 있도록 하기 위하여 다음과 같은 상태궤환 입력을 사용한다.

$$v_0 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \end{bmatrix} z_0$$

식(9)과 (18)로부터 가상의 상태는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} z_{v1} \\ z_{v2} \\ z_{v3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} \qquad \begin{aligned} \dot{z}_{v1} &= k_{11}z_2 + k_{12}z_{v1} + k_{13}z_{v2} + k_{14}z_{v3} \\ \dot{z}_{v2} &= k_{21}z_2 + k_{22}z_{v1} + k_{23}z_{v2} + k_{24}z_{v3} \\ \dot{z}_{v3} &= k_{31}z_2 + k_{32}z_{v1} + k_{33}z_{v2} + k_{34}z_{v3} \end{aligned}$$

차수가 증가된 계통은 다음과 같다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$\dot{z}_{v1} = k_{11}z_2 + k_{12}z_{v1} + k_{13}z_{v2} + k_{14}z_{v3}$$

$$\dot{z}_{v2} = k_{21}z_2 + k_{22}z_{v1} + k_{23}z_{v2} + k_{24}z_{v3}$$

$$\dot{z}_{v3} = k_{31}z_2 + k_{32}z_{v1} + k_{33}z_{v2} + k_{34}z_{v3}$$

차수가 증가된 계통은 다음과 같다.

위 계통에 대하여 슬라이딩 평면을 다음과 같이 구성한다.

$$s_1 = z_{v1} - k_{11}z_1 - k_{12}z_2 - k_{13}z_3 - k_{14}z_4$$

$$s_2 = z_{v2} - k_{21}z_1 - k_{22}z_2 - k_{23}z_3 - k_{24}z_4$$

$$s_3 = z_{v3} - k_{31}z_1 - k_{32}z_2 - k_{33}z_3 - k_{34}z_4$$

차수가 증가된 계통의 상태들이 슬라이딩 평면으로 가도록 하기 위해서 다음 조건을 만족하는 SMC 입력이 구해져야 한다.

$$S^T(x)\ \dot{S}(x) < 0$$

$\dot{s}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{s} = \dot{z}_v - K\frac{\partial T(x)}{\partial x}(f(x) + g(x)u(t) + v(x, t))$$

여기서, $z(t) = T(x)$

불확실성들의 크기가 제한되어 있기 때문에 다음 식을 만족하는 V_{MAX} 가 존재한다.

$$\| S^T K\frac{\partial T(x)}{\partial x} \| \, \| d(t) \| < \| S^T K\frac{\partial T(x)}{\partial x} \| \, V_{MAX}$$

그러므로, 슬라이딩 모드를 보장하는 입력은 다음과 같다.

$$U = \frac{[K\frac{\partial T(x)}{\partial x} g(x)]^{-1} S}{\| S \|^2}\left(-S^T \dot{z}_v + S^T K\frac{\partial T(x)}{\partial x} f(x)\right) - \frac{[K\frac{\partial T(x)}{\partial x} g(x)]^{-1} S}{\| S \|^2} \| S^T K\frac{\partial T(x)}{\partial x} \| V_{MAX}$$

3. 결 론

다중 입력 계통에 대한 슬라이딩 모드 제어기를 설계함에 있어서 궤환 선형화의 기법을 도입하였다. 새로운 슬라이딩 평면을 설계하는 방법에 의해서, 입력 수만큼 가상 상태를 추가해서 새로운 슬라이딩 평면을 정의하였다. 따라서 새로운 슬라이딩 평면은 궤환 선형화의 이론에 의해 제어되는 시스템과 같은 동특성을 가지게 되었다. 결론적으로, SMC와 궤환 선형화를 함께 사용하는 것을 가능케 함으로서, 궤환 선형화의 장점과 SMC의 강인성을 모두 살릴 수 있게 되었다.

[참 고 문 헌]

[1] J.E. Slotine, W Li, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, .New Jersey, 1991

[2] V.I. Utkin : 'Sliding modes and their application in variable structure systems' (Moscow, Mir Publishers,1978)

[3] U. Itkis, Control systems of variable structure, JOHNWILLY & SONS, New York, 1976

[4] J.Y. Hung, W. Gao, J.C. Hung, "Variable structure control : A survey," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 40, No.1 pp.2-22, 1993

[5] Alessandro de luca, Giovanni ulivi "Design of an Exact Nonlinear Controller for Induction Motors," IEEE Trans. on Automatic Control, pp.1304-1308, 1989

[6] 박승규, 안호균, "가상의 상태를 이용한 새로운 스라이딩 모드 제어기" 제어, 자동화, 시스템 공학 논문지, Vol. 5, No.5 pp.505-510, July, 1999