

불확실한 상호연결을 갖는 DC 마이크로그리드 시스템을 위한 강인 분산 퍼지 제어기 설계

이은배*, 구근범**

국립공주대학교 전기전자제어공학부*,

Robust Decentralized Fuzzy Control for DC Microgrid Systems with Uncertain Interconnection

Eun-Bae Lee*, Geun-Bum Koo**

Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University*

Abstract - 본 논문에서는 상호연결 불확실성을 갖는 DC 마이크로그리드 시스템을 대상으로 T-S 퍼지 모델 기반의 강인 분산 제어기 설계 기법을 제안한다. 비선형 시스템을 퍼지 상호연결 모델로 표현하고 Lyapunov 이론을 기반으로 LMI 조건을 도출하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 제어기는 불확실성 하에서도 시스템을 안정화시킬 수 있는 강인 제어에 대한 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지 기반 분산전원의 확대에 DC 마이크로그리드에 대한 관심이 증가하고 있다. DC 마이크로그리드는 단순한 전력 변환 구조와 높은 확장성을 가지지만, 노드 간 상호연결로 인해 동특성이 복잡해지고 파라미터 변동에 따른 불확실성이 존재하여 시스템 안정성 저하를 유발할 수 있으므로 안정성 확보가 중요한 문제로 대두된다. 기존 중앙집중 제어는 계산 부담과 통신 의존성의 한계를 가지므로, 분산 제어 방식이 대안으로 주목받고 있으며, 특히 T-S 퍼지 모델 기반 제어 기법이 활발히 연구되고 있다. 그러나 상호연결 구조에서 발생하는 불확실성을 충분히 고려하지 못하는 한계가 존재한다.

이에, 본 논문에서는 상호연결 구조를 갖는 DC 마이크로그리드 시스템을 대상으로 T-S 퍼지 모델 기반의 강인 분산 제어기 설계 기법을 제안한다. 제안된 방법은 Lyapunov 이론을 기반으로 LMI 조건을 도출하여 시스템의 안정성을 보장하며, 시뮬레이션을 통해 그 유효성과 강인성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 DC 마이크로그리드 모델링

본 논문에서는 다수의 분산전원이 연결된 DC 마이크로그리드 시스템을 고려한다 [1]. 노드는 PV 기반 노드($i=1,3$)와 PMSG 기반 노드($i=2,4$)로 구성되며, 각 노드의 회로 기반 미분방정식은 다음과 같다.

◆ PV 기반 노드

$$\begin{aligned} \dot{v}_{PV(i)} &= \frac{1}{C_{PV(i)}} \left(\frac{\phi_{PV(i)}}{v_{PV(i)}} \right) v_{PV(i)} - \frac{1}{C_{PV(i)}} \phi_{L(i)} u(i) \\ \dot{\phi}_{L(i)} &= \left(-\frac{R_0(i)}{L(i)} - \frac{R_{L(i)}}{L(i)} - \frac{V_D(i)}{L(i)} \right) \phi_{L(i)} \phi_{L(i)} \\ &\quad + \left(\frac{R_0(i)}{L(i)(R_{line}(i) + R_{load})} - \frac{1}{L(i)} \right) v_{0(i)} \\ &\quad - \sum_{j \neq i} \frac{R_0(i) R_{load}}{L(i) * (R(i) + R_{load})} \phi_0(j) \\ &\quad + \frac{1}{L(i)} (V_{D(i)} + v_{PV(i)} - R_M(i) \phi_{L(i)}) u(i) \\ \dot{v}_{0(i)} &= \frac{1}{C_0(i)} \phi_{L(i)} - \frac{1}{C_0(i)(R_{line}(i) + R_{load})} v_{0(i)} \\ &\quad + \sum_{j \neq i} \left(\frac{R_{load}}{C_0(i)(R_{line}(i) + R_{load})} \right) \phi_0(j) \end{aligned} \quad (1)$$

◆ PMSG 기반 노드

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_{ds(i)} &= -\frac{R_s(i)}{L_d(i)} \phi_{ds(i)} + \left(\frac{0.5\omega_g(i) P_n(i) L_q(i) i_{qs}(i)}{L_d(i)} \right) \phi_{qs(i)} \\ \dot{\phi}_{qs(i)} &= -\frac{R_s(i)}{L_q(i)(i_{qs}(i))} \phi_{qs(i)} - \left(\frac{0.5\omega_g(i) P_n(i) L_d(i)}{L_q(i)(i_{qs}(i))} \right) \phi_{ds(i)} \\ \dot{v}_{dc(i)} &= -\frac{1}{C_s(i)(R_{load} + R_{line}(i))} v_{dc(i)} \\ &\quad + \sum_{j \neq i} \frac{R_{load}}{C_s(i)(R_{load} + R_{line}(i))} \phi_0(j) + \frac{3}{2C_s(i)} u(i) \end{aligned} \quad (2)$$

〈표 1〉 DC 마이크로그리드 시스템 파라미터

파라미터	PV 1	PV 2	PMSG 1	PMSG 2
$V_D [V]$	9.1	9.2	-	-
$C_{PV} [F]$	0.0101	0.0108	-	-
$C [F]$	0.0472	0.0411	0.0418	0.0431
$L [H]$	0.0516	0.0514	-	-
$R [\Omega]$	1.7	1.8	8.9	9.0
$R_L [\Omega]$	1.2	1.1	-	-
$L_q [H]$	-	-	0.0629	0.0684
$P_n [-]$	-	-	12	12

시스템에 사용된 주요 파라미터는 표 1에 제시하였으며, 비선형 동역학 (1)과 (2)는 T-S 퍼지 모델을 구성한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) &= \sum_{i=1}^2 h_i^k(z_k(t)) \\ &\quad \times (A_i^k x_k(t) + B_i^k u_k(t) + \sum_{l \neq k} (A_i^{kl} + \Delta A_i^{kl}) x_l(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

이때, $x_k(t) \in R^{n^k}$ 는 노드 k의 상태변수, $u_k(t)$ 는 제어입력, A_i^k 는 k번째 노드의 i번째 상태행렬이며, B_i^k 는 제어입력에 대한 입력행렬을 나타낸다. $h_i^k(z_k(t))$ 는 k번째 노드의 i번째 퍼지 규칙에 대한 소속 함수이며, A_i^{kl} 는 노드 간 상호연결을 나타내는 결합행렬로, DC 라인을 통한 노드 간 전기적 상호작용을 모델링한다. 또한, ΔA_i^{kl} 는 노드 간 상호연결의 불확실성을 나타낸다. 위에서 각 시스템 행렬은 표 1의 파라미터 값을 기반으로 수식 (1)과 (2)에 대한 자코비안 선형화를 통해 유도되며, 이에 본 논문에서는 [1]에서 제시된 수치 행렬을 활용하여 시스템 모델을 구성하였다.

◆ PV 기반 노드

Rule 1

$$A_1^{PV} = \begin{bmatrix} 3.7520 & 0 & 0 \\ 0 & -761.6279 & -18.1749 \\ 0 & 21.1864 & -1.0977 \end{bmatrix}, B_1^{PV} = \begin{bmatrix} -24.7525 \\ 356.5891 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rule 2

$$A_2^{PV} = \begin{bmatrix} 3.3808 & 0 & 0 \\ 0 & -761.6279 & -18.1749 \\ 0 & 21.1864 & -1.0977 \end{bmatrix}, B_2^{PV} = \begin{bmatrix} -24.7525 \\ 410.8527 \\ 0 \end{bmatrix}$$

◆ PMSG 기반 노드

Rule 1

$$A_1^{PMSG} = \begin{bmatrix} -141.4944 & 363.5294 & 0 \\ -363.5294 & -172.8155 & 0 \\ 0 & 35.8852 & -1.2396 \end{bmatrix}, B_1^{PMSG} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 35.8852 \end{bmatrix}$$

Rule 2

$$A_2^{PMSG} = \begin{bmatrix} -141.4944 & 381.8824 & 0 \\ -381.8824 & -164.5102 & 0 \\ 0 & 35.8852 & -1.2396 \end{bmatrix}, B_2^{PMSG} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 35.8852 \end{bmatrix}$$

상호결합 행렬은 [2]에 제시된 블록 행렬을 기반으로 구성하였으며, 비대각 성분을 이용하여 노드 간 결합 구조를 반영하였다. PV 기반 노드의 상호결합 행렬은 다음과 같다.

$$\text{Rule 1: } \bar{A}_1^{PV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2989 & 0 \\ 0 & 4.9398 & 0 \end{bmatrix}, \text{Rule 2: } \bar{A}_2^{PV} = \bar{A}_1^{PV}$$

그리고, PMSG 기반 노드의 상호결합 행렬은 다음과 같다.

$$\text{Rule 1: } \bar{A}_1^{PMSG} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.5780 & 0 \end{bmatrix}, \text{Rule 2: } \bar{A}_2^{PMSG} = \bar{A}_1^{PMSG}$$

각 노드의 비선형 동특성은 선택된 전제부 변수를 기반으로 정의된 소속 함수를 통해 T-S 퍼지 모델로 표현된다.

PV 기반 노드의 경우 전제 변수 $z_k(t) = [\phi_{PV}(k), v_{PV}(k)]$ 에 대해 두 개의 소속 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$h_1^k(z_k(t)) = \frac{z_k^{(2)} - z_k^{(1)}}{z_k^{(2)} - z_k^{(1)}}, \quad h_2^k(z_k(t)) = \frac{z_k^{(1)} - z_k^{(2)}}{z_k^{(2)} - z_k^{(1)}}$$

PMSG 기반 노드의 경우 전제부 변수 $z_i(t) = L_q(t)$ 에 대해 소속 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$h_1^k(L_q(t)) = \frac{L_q^{(2)} - L_q(t)}{L_q^{(2)} - L_q^{(1)}}, \quad h_2^k(L_q(t)) = \frac{L_q(t) - L_q^{(1)}}{L_q^{(2)} - L_q^{(1)}}$$

여기서 $z_k^{(1)}, z_k^{(2)}$ 는 전제 변수의 정의 구간을 나타내는 기준값이며, 각 퍼지 규칙에 대응되는 선형화 기준으로 사용된다. 또한, $L_q^{(1)}, L_q^{(2)}$ 는 PMSG 노드 q 축 인덕턴스의 구간 경계를 의미하며, 표 1의 파라미터를 기반으로 설정된다.

2.2 LMI 기반 강인 분산 퍼지 제어기 설계

본 절에서는 상호결합 불확실성을 갖는 DC 마이크로그리드 시스템을 위한 강인 분산 퍼지 제어기를 설계한다. T-S 퍼지 모델 (3)에 대한 분산 퍼지 제어기는 다음과 같이 정의된다.

$$u_k(t) = \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) K_i^k x_k(t)$$

또한, 수식 (3)에서 상호결합 항의 불확실성은 다음을 만족한다고 가정한다.

$$\Delta A_i^{kl} = D_i^{kl} F^{kl}(t) E_i^{kl}, (F_i^{kl})^T F_i^{kl} \leq I$$

여기서, D_i^{kl}, E_i^{kl} 는 알려진 행렬이며 F_i^{kl} 는 위 조건을 만족한다.

보조정리 1 [2] 임의의 행렬 F 가 $F^T F < I$ 를 만족할 때, 임의의 벡터 a, b 및 스칼라 $\varepsilon > 0$ 에 대해 다음이 성립한다.

$$a^T F b + b^T F a \leq \varepsilon_i^{kl} a^T a + (\varepsilon_i^{kl})^{-1} b^T b$$

보조정리 1을 적용하여 다음의 안정성 조건을 얻을 수 있다.

정리 1 만약 다음 선형 행렬 부등식을 만족하는 양한정 행렬 $X_k, T_{kl}, \bar{S}_{kl}$ 및 행렬 W_j^k 가 존재하면 제안하는 강인 분산 퍼지 제어기는 상호결합 불확실성을 갖는 DC 마이크로그리드 시스템을 안정화시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathcal{E}_{kij} & 0 & D_k & 0 \\ * & -T_i & 0 & E_k \\ * & * & -A_D & 0 \\ * & * & * & -\Lambda_E \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} -\bar{S}_{kl} & G_{kl} \\ * & -T_{kl} \end{bmatrix} < 0$$

여기서,

$$\mathcal{E}_{kij} = A_i^k X_k + B_i^k W_j^k + (A_i^k X_k + B_i^k W_j^k)^T + \tilde{Q}_k + \sum_{l \in N_k} \bar{S}_{kl},$$

$$D_k = [D_i^{kl1} X_k, \dots, D_i^{klm} X_k],$$

$$E_k = \text{diag}(E_i^{kl1} X_k, \dots, E_i^{klm} X_k),$$

$$\Lambda_D^{-1} = \Lambda_E = \text{diag}(\varepsilon_i^{kl1} I, \dots, \varepsilon_i^{klm} I),$$

$$T_i = \text{diag}(T_{kl1}, \dots, T_{klm}), G_{kl} = [D_{kl} X_k \quad E_{kl} X_k]$$

이며, *는 행렬에서의 전치 요소이고, $K_j^k = W_j^k X_k^{-1}$ 이다.

증명) 공간 제약으로 생략한다. ■

2.3 모의실험

본 절에서는 제안된 강인 분산 퍼지 제어기의 성능을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 시스템은 4개의 노드로 구성된 2-rule T-S 퍼지 모델로 구성하였으며, 노드 간 상호결합은 2.1 절에서 정의된 결합행렬을 기반으로 구성하였고, PV 노드와 PMSG 노드 간 결합만을 고려하여 실제 DC 마이크로그리드 환경을 반영하였다. 또한, 상호결합은 약 5% 수준의 불확실성을 가진다고 고려하였다.

정리 1을 통해 제어이득 행렬을 계산하였으며, 각 노드에 따라 다음과 같이 나타난다.

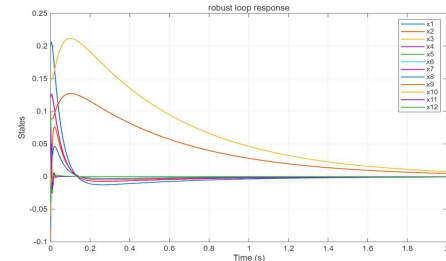
◆ PV 기반 노드의 경우 ($k = 1, 3$)

$$K_1^k = [0.1912 \quad 1.5839 \quad 0.0495], K_3^k = [0.1912 \quad 1.5839 \quad 0.0495]$$

◆ PMSG 기반 노드의 경우 ($k = 2, 4$)

$$K_2^k = [0 \quad -1 \quad -8.8229], K_4^k = [0 \quad -1 \quad -8.8229]$$

제안된 강인 분산 퍼지 제어기를 적용한 시스템의 응답을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 모든 상태변수는 초기 과도응답 이후 빠르게 안정화되며 최종적으로 0 근처로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 실제, 오픈 루프의 경우에는 시스템이 발산하는 특성을 고려할 때, 이러한 결과는 제안된 제어기가 상호연결 불확실성이 존재하는 DC 마이크로그리드 시스템을 효과적으로 안정화함을 보여주며, 강인한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.



〈그림 1〉 강인 분산 퍼지 제어기를 적용한 시스템의 응답

3. 결 론

본 논문에서는 상호연결 불확실성을 갖는 DC 마이크로그리드 시스템에 대해 T-S 퍼지 모델 기반의 강인 분산 퍼지 제어기 설계 방법을 제안하였다. 비선형 시스템을 퍼지 상호연결 모델로 표현하고 Lyapunov 안정성 이론을 통해 LMI 기반 설계 조건을 도출하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기가 불안정한 시스템을 효과적으로 안정화시키고 불확실성 하에서도 강인한 성능을 유지함을 확인하였다. 따라서 본 방법을 통해 상호연결 불확실성을 고려한 DC 마이크로그리드 제어에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Z. Zhong, C.-M. Lin, Z. Shao, and M. Xu, "Decentralized event-triggered control for large-scale networked fuzzy systems," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, 2018.
- [2] I. R. Petersen, "A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems," Systems and Control Letters, vol. 8, pp. 351-357, 1987.