

위상변환기와 발전출력 하이브리드 제어를 이용한 계통 혼잡처리 방안

김규호^{*} 송경빈^{**}
^{*}안산공과대학 ^{**}승실대학교

Power System Congestion Problems using Hybrid Control of
 PST and Real Power Generation

Kyu-Ho Kim^{*} Kyung-Bin Song^{**}
^{*}Ansan College of Technology ^{**}Soongsil University

Abstract - This paper presents a scheme to solve the congestion problem using hybrid control with phase-shifting transformer(PST) and power generation in power systems. A good design of PST and power generation control can improve total transfer capability(TTC) in interconnected systems. This paper deals with an application of optimization technique for TTC calculation. The optimization method is used to maximize power flow of tie line subject to security constraints such as voltage magnitude and real power flow.

The proposed method is applied to 10 machines 39 buses model systems to show its effectiveness.

1. 서 론

우리나라의 계통은 대부분의 발전원은 수도권 남쪽에 위치해 있으며 부하의 40% 이상이 수도권에서 위치해 많은 전력이 남쪽에서 수도권으로 송전된다. 따라서 주요 북상조류를 송전하는 송전선로의 상황과 연계하여 비상사태시 북상조류의 용통전력을 향상시킬 수 있는 실용적인 연구가 필요하다[1].

최근 전력용 반도체소자의 발전에 의해 유연송전시스템(FACTS) 기술이 상당히 발전함에 따라 계통의 비상사태시 위상변환기, TCPST(Thyristor controlled phase-shifting transformer) 및 UPFC(Unified power flow controller) 등을 이용하여 전력조류를 제어함으로써 북상조류의 용통전력을 향상시킬 수 있다[2]. 특히, 위상변환기는 계통전압의 위상각을 변화시켜서 계통의 전력조류를 변화시킬 수 있는 것으로서 대규모 송전계통에서 효율적인 운영을 위한 방법으로 사용되어왔다[3]. 또한, 계통의 과도안정도를 향상시키기 위하여 위상변환기를 사용하는 연구가 진행되었으나 실질적인 응용은 이루어지지 않았다[4].

본 논문에서는 계통 혼잡처리를 위하여 위상변환기(PST)와 발전출력을 이용한 하이브리드 제어를 함으로써 계통의 비상사태시 북상조류의 용통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립함으로써 선로혼잡에 대하여 분석하고 해소할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 북상조류 혼잡처리를 위한 하이브리드 제어

2.1 발전출력 제어

발전기출력 제어에 의한 북상조류 혼잡처리를 위하여 그림 2.1과 같이 다수의 연계선로로 연결된 공급지역(source area)과 수요지역(sink area)을 고려하자.

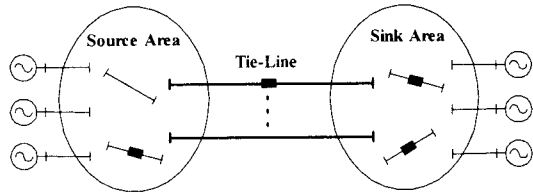


그림 2.1 연계계통
 Fig. 2.1 Interconnected system

그림으로부터 수요지역에서 부하가 증가하거나 사고가 발생할 경우 두 지역을 연결하고 있는 연계선로에 혼잡이 발생하여 계통의 전력수급에 더 큰 문제를 발생시켜 계통붕괴에 까지 이를 수 있다. 이러한 문제는 부하 차단 등에 의하여 방지할 수 있지만, 이것은 수용가의 부하를 강제적으로 탈락시켜야 한다. 그러나 공급지역의 발전출력을 제어하거나 계통에 설치되어 있는 위상변환기를 제어하면 연계선로를 이용한 전력공급을 증가시킬 수 있다. 따라서 식 (2.1)과 같이 정식화하여 연계선로의 전력조류를 증가시키도록 공급지역의 발전량을 제어할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &Max. \sum_{l \in Tie} P_l \\
 &S_{ij} \leq S_{ij, max} \\
 &P_{GSi, min} \leq P_{GSi} \leq P_{GSi, max}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

여기서,
 l : 연계선로 인덱스
 T : 전체 연계선로의 수

G : 발전기 인덱스

$S_{ij}, S_{ij, \max}$: 송전 선로 ij 의 피상전력 및 정격용량

P_{GS} : 공급지역의 발전기 출력

$P_{GS, \max}, P_{GS, \min}$: 공급지역의 발전기 출력 상하한치

2.2 위상변환기를 이용한 조류 제어

변압기 어드미턴스 $y' = |y| \angle \alpha'$ 와 직렬로 $T = 1.0 \angle \psi'$ 의 권수비로 모선 i 와 j 사이에 연결된 위상변환기를 고려하자[2]. 모선 i 와 j 사이에 흐르는 유효전력은 두 모선 사이의 전압위상각에 크게 영향을 받는다. 위상변환기의 각도와 관련하여 두 모선 사이의 유효전력 조류에 관한 일반적인 제어방정식을 유도하기 위하여 위상변환기의 송전단 i 에서 피상전력 S_i 는 식 (2.2)로 표현할 수 있다.

$$S_i = V_i I_i^* \quad (2.2)$$

여기서, $S_i = P_i + jQ_i$ 이며, $V_i = |V_i| \angle \theta_i$ 이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = y_i^* (V_i^2 - V_i V_j T^*) \quad (2.3)$$

여기서, $V_j = |V_j| \angle \theta_j$ 이다. 식 (2.3)으로부터 모선 i 와 j 의 유효전력조류 P_i 와 P_j 는 다음의 식 (2.4)와 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = gV_i^2 - V_i V_j y' \cos(\beta_{ij}) \quad (2.4)$$

$$P_j = gV_j^2 - V_i V_j y' \cos(-\beta_{ij}) \quad (2.5)$$

여기서, $\beta_{ij} = \theta_i - \theta_j - \psi' - \alpha'$ 이다. 결국, 모선 i 의 위상변환기에 대한 유효전력의 편미분함수와 위상변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \psi'} = -V_i V_j y' \sin \beta_{ij} \quad (2.6)$$

$$\Delta \psi' = \frac{-\Delta P_i}{V_i V_j y' \sin \beta_{ij}} \quad (2.7)$$

마찬가지로 모선 j 에 대해서도 유도하면 모선 j 의 위상변환기에 대한 유효전력의 편미분함수와 위상변위는 다음과 같이 식 (2.8)과 (2.9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial P_j}{\partial \psi'} = \frac{\partial P_i}{\partial \psi'} \quad (2.8)$$

$$\Delta \psi' = \frac{\Delta P_j}{V_i V_j y' \sin \beta_{ij}} \quad (2.9)$$

위의 식 (2.7)과 (2.9)는 각각 송전단의 전력 P_i 와 수전단의 전력 P_j 에 대한 위상변환기의 각을 조정하는데

사용된다.

3. 하이브리드 제어 알고리즘

3.1 문제의 정식화

인접한 공급지역(source area)과 수요지역(sink area)을 연결하고 있는 연계선로의 전력조류를 증가시키기 위하여 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{Max. } \sum_{i \in \text{set}} P_i$$

$$P_G - P_L - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_G - Q_L - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$S_{ij} \leq S_{ij, \max}$$

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max}$$

$$P_{GS, \min} \leq P_{GS} \leq P_{GS, \max}$$

$$\psi'_{i, \min} \leq \psi'_i \leq \psi'_{i, \max}$$

$$P_L = P_{L0}(1 + \lambda K_P)$$

$$Q_L = Q_{L0}(1 + \lambda K_Q)$$

(3.1)

여기서,

P_i, Q_i : 모선 i 에서 유효 및 무효전력

L : 부하 인덱스

N : 전체 모선수

G_{ij}, B_{ij} : 모선어드미턴스

θ_{ij} : 모선 i 와 j 의 위상각 차

V_i : 모선 i 의 전압크기

$V_{i, \max}, V_{i, \min}$: 모선 i 의 전압크기 상하한치

P_{L0}, Q_{L0} : 모선 i 에서의 base case 주입전력량

K_P, K_Q : participation factor

λ : 모선 발전량 증가를 표현하는 파라미터는 $\lambda = 0$

기준사례, $\lambda = \lambda_{\max}$ 일 때 최대전력전송

식 (3.2)에서 $\lambda = 0$ 인 기준사례로부터 $\lambda = \lambda_{\max}$ 가 되는 경우까지 P_{L0}, Q_{L0} 를 최적화시킨다. $\lambda = \lambda_{\max}$ 인 경우 TTC가 결정된다.

4. 사례연구

본 논문에서는 위상변환기와 발전출력 제어에 의한 N-1의 상정사고시 연계선로의 전력조류를 변화시켜 유효전력을 증가시키는 방안을 제안하였다.

그림 4.1에 제시된 IEEE 10기 39모선 모델계통에 적용하여 유효전력을 증대시키기 위하여 다음과 같은 Case에 적용하여 효율성을 입증하였다.

Case 1 : 수요지역의 부하증분과 위상변환기 및 발전 출력 제어(공급지역)

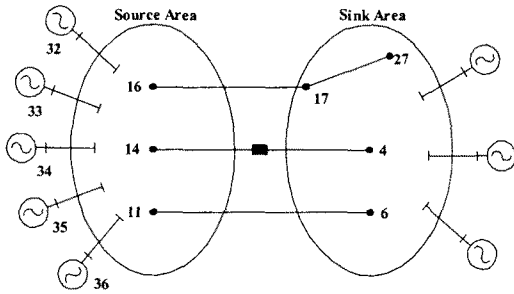


그림 4.1 간략화한 10기 39모선 계통도
Fig. 4.1 Simplified 10 machines and 39 buses systems

표 4.1 하이브리드제어 전후의 연계선로 조류변화(Case 1)
Table 4.1 Tie-line flow of pre and post hybrid control(Case 1)

		제어전 발전량[MW]	제어후 발전량[MW]
위상변환기(PST)		미설치	모선 4 - 14 제어각 : 약1°
발전제어 모선	32	670.3	618.9
	33	651.7	786.4
	34	523.9	662.7
	35	1021.5	1147.9
	36	577.8	507.6
총송전용량(TTC)		1007.1	1272.3

표 4.1은 Case 1에 대하여 모선 4 - 14 선로에 위상변환기와 공급지역의 발전기 출력을 제어하는 하이브리드 제어에 의하여 용통전력을 계산한 결과를 나타내었다. Case 1의 수요지역의 부하를 증가시키면서 용통전력을 계산한 것으로서 제어를 하지 않았을 때는 모선 11 - 6 사이의 선로의 제약(400[MW])에 걸려 총송전용량(TTC)은 1007.1[MW] 인데, 위상변환기와 발전기 출력 등을 이용한 하이브리드 제어를 하였을 때에는 다른 연계선로를 통해 전력이 전달되어 TTC가 1272.3[MW]으로 증가되어 271.2[MW] 만큼 향상시켰다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통 혼잡처리를 위하여 위상변환기와 발전비용이 저렴한 지역의 발전출력을 이용한 하이브리드 제어를 함으로써 계통의 비상사태시 부상조류의 용통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립하였다.

향후 연구로는 송전신뢰도 여유(Transmission Reliability Margin) 및 송전용량 편익 여유(Capacity Benefit Margin) 등을 고려하여 연계지역의 가용송전용량(Available Transfer Capability)을 계산함으로써 계통의 혼잡을 원활히 처리할 수 있는 기법개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초 전력연구원 주관으로 수행된 과제(R-2005-B-111)임.

[참 고 문 헌]

- [1] 김규호, 신호성, 송경빈, "Phase-Shifting Transformer를 이용한 계통 혼잡처리 방안" 대한전기학회 하계학술대회, pp.822-824, 2005.
- [2] R. D. Youssef, "Phase-Shifting Transformers in Load Flow and Short-Circuit Analysis : Modelling and Control", IEE Proceedings-C, Vol.140, No.4, pp.331-336, July 1993
- [3] J. Bladow, and A. Montoya, " Experiences with Parallel EHV Phase Shifting Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.6, No.3, pp.1096-1100, 1991
- [4] D. O'kelley, and G. Musgrave, "Improvement of Power System Transient Stability by Phase-Shift Insertion", IEE Proceedings-C, Vol.120, No.2, pp.247-251, 1973
- [5] C. T. Lawrence and A. L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996.