

계통 혼잡처리를 위한 Phase-Shifting Transformers의 최적 위치 선정

論 文
54A-12-2

Optimal Placement Design of Phase-Shifting Transformers for Power System Congestion Problems

金圭浩* · 宋敬彬†
(Kyu-Ho Kim · Kyung-Bin Song)

Abstract - This paper presents a scheme to design optimal placement of phase-shifting transformers for power system congestion problems. A good design of phase-shifting transformers placement can improve total transfer capability in interconnected systems. In order to find the optimal placement of phase-shifting transformers, the power flows of the interesting transmission lines are evaluated using sequential quadratic programming technique. This algorithm considers power balance equations and security constraints such as voltage magnitudes and transmission line capacities. The proposed scheme is tested in 10 machines 39 buses and IEEE 57 buses systems. Test result shows that the proposed method can find the optimal placement of phase-shifting transformers to solver power system congestion problems.

Key Words : Phase-Shifting Transformer(PST), PST Location, Congestion management, Total Transfer Capability

1. 서 론

전력의 판매와 구매에 경쟁체제와 시장기능을 도입함으로써 송전선로의 공급능력 한계로 인한 선로의 혼잡 발생 및 처리에 관한 방안이 중요한 관심사이다. 선로 혼잡처리에 관한 문제는 향후 복상조류의 용통전력을 향상시키며 지역간 송전선로의 최대송전용량을 확보하는데 중요한 문제가 될 수 있다[1,2].

또한, 급변하는 계통조건 및 계통상황에 대하여 능동적인 대처를 위하여 계산시간을 줄일 수 있는 알고리즘이 필요하다. 따라서 최적화기법을 이용하여 송전용량을 증가시킬 수 있는 최적조류계산 해석을 함으로써 송전선로의 공급능력 한계로 인하여 발생하는 선로의 혼잡을 해결할 수 있다. 특히, 우리나라의 계통은 대부분의 발전원은 수도권 남쪽에 위치해 있으며 부하의 40%이상이 수도권에서 위치해 많은 전력이 남쪽에서 수도권으로 송전된다. 따라서 주요 복상조류를 송전하는 송전선로의 상황과 연계하여 비상사태시 복상조류의 용통전력을 향상시킬 수 있는 실용적인 연구가 필요하다[3].

최근 전력용 반도체소자의 발전에 의해 유연송전시스템

(Flexible AC transmission system : FACTS) 기술이 상당히 발전함에 따라 계통의 비상사태시 위상변환기, Thyristor controlled phase-shifting transformer (TCPST) 및 Unified power flow controller(UPFC) 등을 이용하여 전력조류를 제어함으로써 복상조류의 용통전력을 향상시킬 수 있다[4]. FACTS 개념은 선로의 리액티스, 모선전압의 크기와 위상각을 조정하여 선로조류를 재배분하고 모선전압을 조정함으로써 임계상황으로 되는 것을 완화시킬 수 있다. 특히, 위상변환기는 계통전압의 위상각을 변화시켜서 계통의 전력조류를 변화시킬 수 있는 것으로서 대규모 송전계통에서 효율적인 운영을 위한 방법으로 사용되어왔다[5]. 또한, 계통의 과도 안정도를 향상시키기 위하여 위상변환기를 사용하는 연구가 진행되었으나 실질적인 응용은 이루어지지 않았다[6]. 모든 선로에 위상변환기를 설치하면 완벽하게 전력조류를 제어할 수는 있지만 비용 측면에서 비효율적이므로 새로운 위상변환기를 설치하기 위한 최적의 위치를 결정하는 연구가 진행되었다[7].

본 논문에서는 위상변환기를 도입하여 계통 혼잡처리를 위한 계통 연계선로의 전력조류를 증가시킬 수 있는 최적의 PST 설치위치와 알고리즘을 개발함으로써 선로혼잡에 대하여 분석하고 해소할 수 있는 방안을 제시하였다. 특히, 최적의 위상변환기 설치위치를 선정하기 위하여 모든 후보 선로에 위상변환기를 설치한 후에 N-1의 상정사고를 적용하여 연계선로의 용통전력이 최대인 지점을 위상변환기 설치위치로 선정하였다. 최적의 위상변환기 위치를 결정한 후, 최적화기법을 이용하여 위상변환기를 제어함으로써 연계선로의 조

* 교신저자, 正會員 : 崇實大學校 電氣制御시스템工學部
助教授 · 工博
E-mail : kbsong@ssu.ac.kr

* 正會員 : 安山工科大學 電氣科 副教授 · 工博,
接受日字 : 2005年 9月 8日
最終完了 : 2005年 11月 11日

류를 최대한으로 송전할 수 있도록 하였다.

2. 복상조류 혼잡처리를 위한 기기의 모델링

2.1 위상변환기(phase-shifting transformer) 모델

위상변환기는 송전선로에서 전류 및 전압의 위상각을 변화시킬 수 있는 변압기의 일종이다. 일반적으로 위상변환기는 두개의 변압기로 구성된다. 송전선로에 직렬로 연결된 변압기는 전압을 변화시킬 수 있고, 탭-변환 변압기는 그 송전선로에 위상이 90° 뒤진 전압을 공급한다. 그 결과 직렬로 연결된 변압기의 전압 V_{out} 은 $V_{out} = V_{in} + \Delta V$ 로 주어지고, ΔV 와 V_{in} 은 90°의 위상차가 나므로, V_{out} 은 ΔV 의 크기에 따라 결정되는 ψ 에 의해 V_{in} 의 위상과 상대적으로 변화된 위상을 가진다. 그림 2.1에서 알 수 있듯이, 위상변환 ψ 가 작다면, 전압의 크기는 거의 변하지 않으며 $V_{out} = 1.0e^{j\psi} V_{in}$ 이 될 것이다.

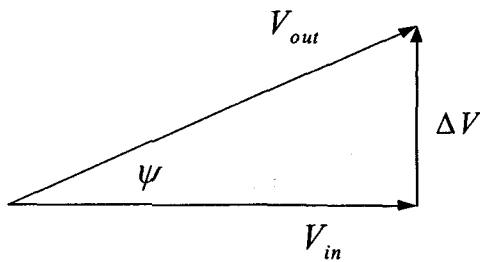


그림 2.1 위상변환기의 전압

Fig. 2.1 Voltage of Phase-shifting transformer

그림 2.2와 같이 변압기 어드미턴스 $y' = |y| \angle \alpha'$ 와 직렬로 $T = 1.0 \angle \psi$ 의 권수비로 모선 i 와 j 사이에 연결된 위상변환기를 고려하자[4].

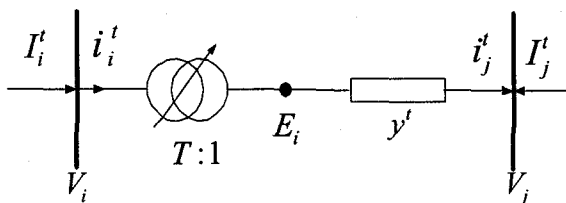


그림 2.2 위상변환기

Fig. 2.2 Phase-shifting transformer

그림 2.2로부터 위상변환기 양단의 전압관계는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_i}{E_i} = T = \frac{i_j'}{i_i'}, \quad E_i = T^* V_i \quad (2.1)$$

식 (2.1)로부터 전류에 관한 식으로 변형하면 식 (2.2),

(2.3)과 (2.4)로 나타낼 수 있다.

$$T^{-1} = T^*, \quad i_j' = T^* i_i' \quad (2.2)$$

$$i_i' = T i_j' = y' T (T^* V_i - V_j) \quad (2.3)$$

$$i_i' = y' (V_i - TV_j) \quad (2.4)$$

또한, $I_i' = i_i'$, $I_j' = -i_j'$ 를 식 (2.2)과 (2.3)을 이용하여 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_i' \\ I_j' \end{bmatrix} = y_i' \begin{bmatrix} 1 & -T \\ -T^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

그러므로 위상변환기의 어드미턴스 행렬 Y 의 비대각요소는 다음과 같이 비대칭임을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= -Ty' \\ Y_{ji} &= -T^*y' \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.2 조류계산을 위한 PST의 표현

Newton-Raphson 조류계산을 하기 위한 수정방정식은 다음과 같다.

$$\delta P_i = P_i^{\phi} - V_i^2 G_{ii} - V_i \quad (2.7)$$

$$\times \sum_{j \in i, j \neq i} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) V_j$$

$$\delta Q_i = Q_i^{\phi} - V_i^2 B_{ii} - V_i$$

$$\times \sum_{j \in i, j \neq i} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) V_j$$

모선 어드미턴스행렬의 $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 구성요소는 위상변환기가 표현된 것으로서 식 (2.6)으로부터 식 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{ij} = -Ty' = -T(g' + jb') = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.8)$$

$$Y_{ji} = -T^*y' = G_{ji} + jB_{ji}$$

그러므로 정리하면 식 (2.9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{ij} = (b' \sin \psi' - g' \cos \psi') - j(g' \sin \psi' + b' \cos \psi') \quad (2.9)$$

$$Y_{ji} = -(b' \sin \psi' + g' \cos \psi') + j(g' \sin \psi' - b' \cos \psi')$$

2.3 위상변환기를 이용한 전력조류 제어

그림 2.2에서 모선 i 와 j 사이에 흐르는 유효전력은 두 모

선 사이의 전압위상각에 크게 영향을 받는다. 위상변환기의 각도와 관련하여 두 모선 사이의 유효전력 조류에 관한 일반적인 제어방정식을 유도하기 위하여 그림 2.2의 변압기 어드미턴스 $y^t = y \angle \alpha^t$ 와 직렬로 $T = 1.0 \angle \psi^t$ 의 권수비로 모선 i 와 j 사이에 연결된 위상변환기를 고려한다. 위상변환기의 송전단에서 피상전력 S_i 는 식 (2.10)으로 표현할 수 있다.

$$S_i = V_i I_i^* \quad (2.10)$$

여기서, $S_i = P_i + jQ_i$ 이며, $V_i = |V_i| \angle \theta_i$ 이다. 식 (2.6)과 (2.10) 으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = y^{*t} (V_i^2 - V_i V_j T^*) \quad (2.11)$$

여기서, $V_j = |V_j| \angle \theta_j$ 이다. 식 (2.11)로부터 모선 i 와 j 의 유효전력조류 P_i 와 P_j 는 다음의 식 (2.12)와 (2.13)으로 나타낼 수 있다.

$$P_i = gV_i^2 - V_i V_j y^t \cos(\beta_{ij}) \quad (2.12)$$

$$P_j = gV_j^2 - V_i V_j y^t \cos(-\beta_{ij}) \quad (2.13)$$

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

$$\frac{\partial P_i}{\partial \psi^t} = -V_i V_j y^t \sin \beta_{ij} \quad (2.14)$$

$$\Delta \psi^t = \frac{-\Delta P_i}{V_i V_j y^t \sin \beta_{ij}} \quad (2.15)$$

마찬가지로 모선 j 에 대해서도 유도하면 모선 j 의 위상변환기에 대한 유효전력의 편미분함수와 위상변위는 다음과 같이 식 (2.16)과 (2.17)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial P_j}{\partial \psi^t} = \frac{\partial P_i}{\partial \psi^t} \quad (2.16)$$

$$\Delta \psi^t = \frac{\Delta P_j}{V_i V_j y^t \sin \beta_{ij}} \quad (2.17)$$

위의 식 (2.15)와 (2.17)은 각각 송전단의 전력 P_i 와 수신단의 전력 P_j 에 대한 위상변환기의 각을 조정하는데 사용된다.

3. 유통전력의 계산

3.1 연속조류계산을 이용한 유통전력 계산

연속조류계산(Continuation Power Flow : CPF)은 최대 주

입전력량을 찾는 일반적인 방법으로, 전력을 주입하는 지역의 유효 전력량을 계통 안전도 제약을 위반하지 않는 범위까지 증가시키므로써 최종적으로 연계선로의 전력조류를 계산할 수 있는 방법이다[8]. CPF를 이용하여 연계선로의 전력조류를 결정하는 방법의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$\text{Max.} \quad \sum_{t=1}^T P_t \quad (3.1)$$

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

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

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

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

여기서,

t : 연계선로 인덱스

T : 전체 연계선로의 수

P_i, Q_i : 모선 i 에서 유효 및 무효전력

G : 발전기 인덱스

L : 부하 인덱스

N : 전체 모선의 수

G_{ij}, B_{ij} : 모선 어드미턴스

S_{ij} : 송전 선로 ij 의 피상전력

$S_{ij, \text{max}}$: 송전 선로 ij 의 정격용량

θ_{ij} : 모선 i 와 j 의 위상각 차

V_i : 모선 i 의 전압크기

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

연계선로의 전력조류를 계산하기 위해 위 식에서 부하를 모선의 부하증가를 표현하는 λ 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$P_L = P_{L0} (1 + \lambda K_P) \quad (3.2)$$

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

여기서,

P_{L0}, Q_{L0} : 모선 i 에서의 기준사례(Base Case) 주입전력량

K_P, K_Q : participation factor

λ : 모선 발전량 증가를 표현하는 파라미터는 $\lambda=0$ 기준 사례, $\lambda=\lambda_{\text{max}}$ 일 때 최대전력전송

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

3.2 순차적비선형계획법을 이용한 용통전력 계산

순차적비선형계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)은 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다[9]. 이 알고리즘을 식 (3.1)과 (3.2)에 적용하여 연계선로의 전력조류를 계산할 수 있다. SQP 방법의 일반적인 알고리즘 구성을 요약하면 다음과 같이 3단계로 구성된다.

절차 1 : 초기화(Initialize)

변수 x_0 , 탐색방향 d_0 , 스텝 크기 t_0 . 변수 x_0 가 실행가능 영역의 초기값일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(Search)

- i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 비선형 문제의 해를 계산하여 탐색 방향을 결정한다.
- ii) 목적함수와 등식, 부등식의 모든 제약을 만족하는 스텝 크기(Step Size)를 결정한다.

절차 3 : 반복계산(Update)

- i) 헤시안 행렬 업데이트.
- ii) $x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \bar{d}_k$

여기서, t_k : k번째 스텝 크기

d_k : k번째 탐색 방향

\bar{d}_k : d_k 를 사용해 얻어지는 비선형 문제의 해

- iii) 제약식을 포함한 라그랑제 문제의 해석

$$\min \left\| \sum_{j=1}^{n_f} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \zeta_k + \sum_{j=1}^{l_f} \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \sum_{j=1}^{l_g} \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=1}^{l_h} \nu_j \nabla h_j(x_{k+1}) \right\|^2 \quad (3.3)$$

여기서, $\zeta_{k,j}$, ζ_k , $\mu_{k,j}$, $\lambda_{k,j}$ 는 비선형 문제 및 제약식과 관련된 K-T승수이다.

3.3 위상변환기 설치위치 선정

모든 선로에 위상변환기를 설치하면 전력계통의 제어 측면에서 다양한 운용이 가능하지만 비현실적이다. 따라서 위상변환기를 설치하는데 있어 혼잡비용, 계통운영비용, 계통손실, 계통의 송전선로의 제약 완화 등 목적에 적합한 최적의 위치를 찾음으로써 현실적인 위상변환기 설치 방안을 제시하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 최적의 위상변환기 설치위치를 선정하기 위하여 목적함수를 식 (3.1)과 같이 연계지역간 용통전력의 최대화로 하였다. 세부절차로 위상변환기가 설치가능한 모든 후보선로에 대해 연계선로 용통전력을 계산한다. 각각의 후보선로에 위상변환기가 설치되고, 제약조건으로 유효전력방정식과 무효전력방정식을 만족하며, 선로용량과 전압의 크기 제약을 만족하는 동시에 N-1의 상정사고를 적용한 연계선로의 용통전력을 계산한다. 위상변환기가 설치된 후보선로중 연계선로의 용통전력이 최대인 선로를 위상변환기 설치위치로 선

정하였다. 즉, 선정된 위상변환기 설치 위치는 N-1의 상정사고를 고려하고 연계지역간 용통전력을 최대화한다.

4. 사례연구

본 연구에서는 위상변환기를 설치하여 N-1의 상정사고시 연계선로의 전력조류를 변화시켜 용통전력을 증가시키는 방안을 제안하였다.

Case 1 : 10기 39모선 계통

위상변환기의 최적위치 선정 알고리즘은 그림 4.1에 제시된 IEEE 10기 39모선 모델계통에 적용하여 용통전력을 증대시키는 방안의 효용성을 입증하였다. IEEE 10기 39모선 모델계통에서 지역 2에서 부하가 증가하여 두 지역을 연계하는 송전선로 3개를 이용하여 지역 1에서 공급하는 것으로 하였다. 제안한 알고리즘은 부하 증가지역에 전력을 공급하기 위하여 연계선로의 전력조류 증대에 목적을 두었다.

제시한 위상변환기 설치위치 선정 알고리즘에 의하여 표 4.1과 같이 최적의 설치위치와 연계선로의 조류를 나타내었다. 이 평균값은 그 선로에 위상변환기를 설치한 후 모든 선로에 N-1의 상정사고를 적용하여 연계선로의 조류를 나타낸 것으로 모선 17 - 16, 모선 6 - 11, 모선 4 - 14 등의 순서로 연계선로 조류가 증가하였다. 특히, 모선 17 - 16의 선로에 위상변환기를 설치하고 나머지 모든 선로에 N-1의 상정사고를 적용하였을 때 지역 1에서 지역 2로 공급되는 TTC는 1061.84[MW]로 가장 많은 전력이 변화하였다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 선로에 위상변환기를 설치하여 비상사태시 연계선로에 흐르는 전력조류를 증대시킴으로써 용통전력 또한 증가시킬 수 있다.

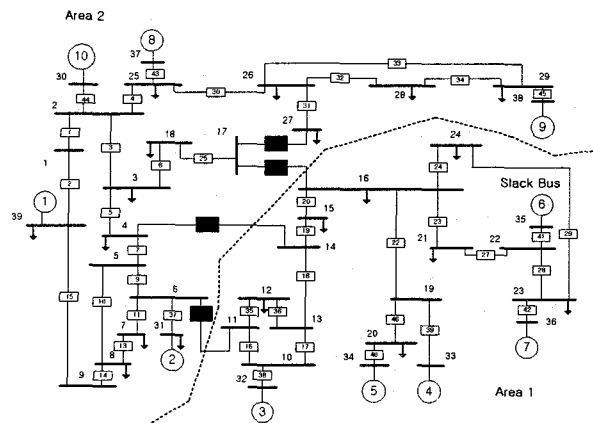


그림 4.1 10기 39모선 계통도
Fig. 4.1 10 machines and 39 buses systems

표 4.2는 모선 17 - 16의 선로에 위상변환기를 설치하여 식 (3.1)과 (3.2) 그리고 3.2절의 순차적비선형계획법을 이용하여 용통전력을 계산한 결과를 나타내었다. 표는 위상변환기 설치후의 연계선로의 조류변화, 용통전력 및 위상변환기 설치선로의 전력조류를 나타낸 것으로서 모선 4 - 14의 선로에 위상변환기를 설치하기 전에는 모선 6 - 11의 선로제약

400[MW]에 걸쳐 1007.73[MW]의 전력만 연계선로를 통하여 지역 1에서 지역 2로 전달되던 것이 위상변환기 설치후에는 1061.84[MW]로 약 54.11[MW] 증가되었다. 또한 위상변환기를 설치한 선로는 모선 16에서 모선 17 방향으로 송전전력이 309.0[MW]에서 383.8[MW]로 증가하였음을 알 수 있다. 한 개의 선로에 위상변환기를 설치하여 용통전력을 증가시켰으나 다수의 위상변환기를 이용하면 비상사태시 지역 1에서 지역 2로의 용통전력을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

표 4.1 최적의 위상변환기 설치 위치

Table 4.1 Optimal PST Installation Location

	위상변환기 설치 위치 (from - to)	설치위치별 Tie-Line Flow[MW]
미설치	-	1007.73
1	17 - 16	1061.84
2	6 - 11	1061.76
3	4 - 14	1061.71
4	27 - 17	1031.69

표 4.2 위상변환기 설치후의 연계선로 조류 변화

Table 4.2 Tie-line flow with PST

위상변환기 설치선로 (17 - 16)	Tie-Line Flow[MW]	위상변환기 설치선로의 전력조류[MW]
without PST	1007.73	309.0
with PST	1061.84	383.8

Case 2 : 57모선 80선로 계통

그림 4.2에 제시된 IEEE 57모선 80선로 모델계통에 적용하여 본 논문에서 제시한 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

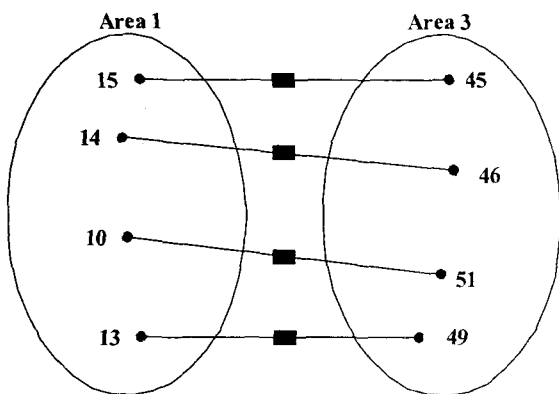


그림 4.2 IEEE 57모선 간략화한 계통도

Fig. 4.2 Simplified IEEE 57 buses systems

지역 3을 부하가 증가하는 소비지역으로 하였으며 그림

4.2에 나타난 4개의 선로를 연계선로로 하여 지역 1에서 발전량을 증가하여 전력을 공급하는 것으로 하였다. 표 4.3은 위상변환기 위치선정 알고리즘에 의하여 선정된 최적의 설치 위치를 나타내었다. 표 4.4는 모선 10 - 51 선로에 위상변환기를 설치하여 용통전력을 계산한 결과를 나타낸 것으로 TTC는 211.42[MW]이며, 연계선로의 전력조류와 위상변환기 설치선로의 조류가 증가했음을 알 수 있다.

또한, 다수의 위상변환기와 발전비용이 저렴한 지역의 발전기 유효전력출력을 제어하면 비상사태시 지역 1에서 지역 2로의 용통전력을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

표 4.3 최적의 위상변환기 설치 위치

Table 4.3 Optimal PST Installation Location

	위상변환기 설치 위치 (from - to)	설치위치별 Tie-Line Flow[MW]
미설치	-	199.36
1	10 - 51	211.42
2	15 - 45	203.43
3	14 - 46	201.12
4	13 - 49	199.36

표 4.4 위상변환기 설치후의 연계선로 조류 변화

Table 4.4 Tie-line flow with PST

위상변환기 설치선로 (3 - 15)	Tie-Line Flow[MW]	위상변환기 설치선로의 전력조류[MW]
without PST	199.36	56.7
with PST	211.42	79.8

5. 결 론

본 연구에서는 위상변환기(Phase-shifting transformer : PST)를 도입하여 계통 연계선로의 용통전력을 증가시키기 위하여 최적의 위상변환기 설치 위치를 결정하는 알고리즘과 계통의 비상사태시 용통전력을 증가시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 특히, N-1의 상정사고를 적용하여 연계선로의 평균조류가 최대인 선로를 위상변환기 설치위치로 선정함으로써 비상사태시 용통전력을 증가시킴으로써 선로혼잡을 해소할 수 있었다.

향후 연구로는 계통 혼잡처리를 위하여 다수의 위상변환기와 발전비용이 저렴한 지역의 발전출력을 이용한 하이브리드 제어를 함으로써 계통의 비상사태시 부상조류의 용통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립할 필요가 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] North American Electric Reliability Council (NERC), "Available Transfer Capability - Definitions and Determinations", NERC Report, June 1996.

[2] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang, W. F. Tinney, "Available Transfer Capability Calculations", IEEE Trans. on Power System, Vol. 13, No. 4, Nov.1998.

[3] 김규호, 박진욱, 김진오, 신동준, "전압제약을 고려한 가용 송전용량 결정 및 분석", 대한전기학회 전력기술부문회 추계 학술대회, 2004, pp.169-171.

[4] 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

[5] J. Bladow, and A. Montoya, " Experiences with Parallel EHV Phase Shifting Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.6, No.3, pp.1096-1100, 1991

[6] 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

[7] P. Damrongkulkamjorn, P. Arcot, P. Dcuto, "A screening technique for optimally locating phase shifters in power systems", IEEE Summer meeting, pp.233-238, 1994

[8] V. Ajarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power System, Vol. 7, no. 1, pp.416-423, February 1992.

[9] C. T. Lawrence and A. L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996.

저 자 소 개



김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 안산공과대학 전기과 부교수



송경빈 (宋敬彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M전기공학과 졸업(공박). 1996년 한전전력연구원 선임연구원. 1998년 대구효성가톨릭대학교 전임강사. 2000년 계명대학교 전임강사. 2002년 숭실대학교 전기제어시스템공학부 전임강사. 2004년-현재 숭실대학교 전기제어시스템공학부 조교수.