

Phase-Shifting Transformer를 이용한 계통 혼잡처리 방안

김규호*, 신호성**, 송경빈**

*안산공과대학, **숭실대학교

Congestion management Using Phase-Shifting Transformer in Power Systems

Kyu-Ho Kim* Ho-Sung Shin** Kyung-Bin Song**

*Ansan College of Technology **Soongsil University

Abstract - This paper presents a scheme to solve the congestion problem using phase-shifting transformer(PST) in power systems. Available transfer capability(ATC) is an important indicator of the usable amount of transmission capacity accessible by several parties for commercial trading in power transaction activities. This paper deals with an application of optimization technique for ATC calculation. Sequential quadratic programming(SQP) 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

전력의 판매와 구매에 경쟁체제와 시장기능을 도입함으로써 송전선로의 공급능력 한계로 인한 선로의 혼잡 발생 및 처리에 관한 방안이 중요한 관심사이다. 선로 혼잡처리에 관한 문제는 향후 북상조류의 융통전력(Available transfer capability : ATC)을 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 알고리즘 이 필요하다. 따라서 최적화기법을 이용하여 송전용량을 증가시킬 수 있는 최적조류계산 해석을 함으로써 송전선로의 공급능력 한계로 인하여 발생되는 선로의 혼잡을 해결한다. 특히, 계통의 비상사태시 북상조류의 융통전력을 향상시킬 수 있는 매우 실용적인 연구로 필요성이 매우 높다[3].

최근 전력용 반도체소자의 발전에 의해 유연송전시스템(FACTS)의 기술은 상당히 발전함에 따라, 계통의 비상사태시 북상조류의 융통전력을 향상시키는데 PST, TCPST 및 UPFC 등의 전력조류를 제어할 수 있는 기기를 이용하면 이러한 문제점을 극복할 수 있다[4]. FACTS 개념은 선로의 리액턴스, 모선전압의 크기와 위상각을 조정하여 선로조류를 재배분하고 모선전압을 조정함으로써 임계상황으로 되는 것을 완화시킬 수 있다.

본 연구에서는 위상변환기(phase-shifting transformer

: PST)를 도입하여 계통 혼잡처리를 위한 계통 연계선로의 전력조류를 증가시킬 수 있는 최적의 PST 설치 위치와 알고리즘을 개발함으로써 선로혼잡에 대하여 분석하고 해소할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 북상조류 혼잡처리를 위한 기기의 모델링

2.1 위상변환기(phase-shifting transformer)

그림 2.1과 같이 변압기 어드미턴스 $y' = |y'| \angle \alpha'$ 와 직렬로 $T = 1.0/\psi'$ 의 권수비로 모선 i 와 j 사이에 연결된 위상변환기를 고려하자.

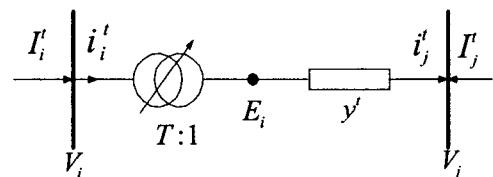


그림 2.1 위상변환기
Fig. 2.1 Phase-shifting transformer

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

$$\frac{V_i}{E_i} = T = \frac{i_k^{*t}}{i_i^{*t}}, E_i = T^* V_i \quad (2.1)$$

식 (2.1)로부터 전류에 관한 식으로 변형하면 식 (2.2), (2.3)과 (2.4)로 나타낼 수 있다.

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

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

$$i_i^t = y' (V_i - T V_j) \quad (2.4)$$

때문에 $I'_i = i_i^t$, $I'_j = -i_i^t$ 와 식 (2.2)과 (2.3)를 이용하여 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ I'_j \end{bmatrix} = y' \begin{bmatrix} 1 & -T \\ -T^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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

$$Y_{ij} = -y' T \quad (2.6)$$

$$Y_{ji} = -\mathbf{y}' T^* \quad (2.7)$$

어드미턴스 행렬의 $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 구성요소는 위상변환기가 표현된 것으로서 식 (2.6)과 (2.7)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

그러므로

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

$$Y_{ji} = -(b'\sin\psi' + g'\cos\psi') + j(g'\sin\psi' - b'\cos\psi') \quad (2.10)$$

3. 융통전력의 계산

3.1 CPF를 이용한 융통전력 계산

연속조류계산(Continuation Power Flow : CPF)은 최대 주입전력량을 찾는 일반적인 방법으로, 전력을 주입하는 지역의 유효 전력량을 계통 안전도 위반을 넘지 않는 범위까지 증가시킴으로써 최종적으로 연계선로의 전력조류를 계산할 수 있는 방법이다[5]. CPF를 이용하여 연계선로의 전력조류를 결정하는 방법의 수학적인 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Max. } \sum_{i \in \text{bus}} P_i \\ & P_G - P_L - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ & Q_G - Q_L - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ & S_{ij} \leq S_{ij,\max} \\ & V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서,

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

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

P_i, Q_i : 모선 i 에서 유효 및 무효전력

G : 발전기

L : 부하

N : 전체 모선수

G_{ij}, B_{ij} : 모선어드미턴스

S_{ij} : 송전 선로 ij 의 피상전력

$S_{ij,\max}$: 송전 선로 ij 의 정격용량

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 상한한치

연계선로의 전력조류를 계산하기 위해 위 식에서 부하를 모선의 부하증가를 표현하는 λ 의 식으로 나타내면

$$P_{ij} = P_{i,0}(1+\lambda K_P) \quad (3.2)$$

$$Q_{ij} = Q_{i,0}(1+\lambda K_Q) \quad (3.2)$$

여기서,

$P_{i,0}, Q_{i,0}$: 모선 i 에서의 base case 주입전력량

K_P, K_Q : participation factor

위 식에서 $\lambda = 0$ 인 base case로부터 $\lambda = \lambda_{\max}$ 가 되는 경우까지 $P_{i,0}, Q_{i,0}$ 를 증가시킨다. $\lambda = \lambda_{\max}$ 인 경우 TTC가 결정된다.

3.2 SQP를 이용한 융통전력 계산

순차적2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)은 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다[6]. 이 알고리즘을 식 (3.1)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 , step size t_0 . 변수 x_0 가 실행불가능 영역의 초기값일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(search)

- 변수 및 해시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산하여 탐색 방향을 결정한다.
- 목적함수와 등식, 부등식의 모든 제약을 만족하는 step size를 결정한다.

절차 3 : 반복계산(update)

- 해시안 행렬 업데이트.

$$ii) x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \bar{d}_k$$

여기서, t_k : k번째 step size

d_k : k번째 탐색 방향

\bar{d}_k : d_k 를 사용해 얻어지는 QP 문제의 해

- 제약식을 포함한 라그랑제 문제의 해석

$$\begin{aligned} \min & \| \sum_{j=1}^n \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^n \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \\ & \sum_{j=0}^t \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^t \mu_j \nabla h_j(x_{k+1}) \|^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

3.3 PST 설치위치 설정

본 연구에서는 최적의 PST 설치위치를 선정하기 위하여 목적함수를 연계 지역간 융통전력의 최대화로 하였다. 또한, 모든 후보 선로에 PST를 설치한 후에 $n-1$ 의 상정사고를 적용하여 연계선로의 융통전력이 최대인 지점을 PST 설치위치로 선정하였다. 즉, 선정된 PST 설치위치는 $n-1$ 의 상정사고에 불구하고 연계 지역간 융통전력을 최대화한다.

4. 사례연구

본 연구에서는 PST를 설치하여 $n-1$ 의 비상사태시 연계선로의 전력조류를 변화시켜 융통전력을 증가시키는 방안을 제안하였다.

그림 4.1의 IEEE 10기 39모선 모델계통에 적용하여 융통전력을 증대시키는 방안의 효용성을 입증하였다. 또한, 지역 1과 지역 2를 연결하는 연계선로(Tie-Line)로는 모선 4 - 14, 모선 6 - 11 및 모선 16 - 17을 연결하고 있는 선로로 하였다.

PST 설치위치 설정 알고리즘에 의하여 표 4.1과 같이 최적의 설치위치와 연계선로 조류의 평균을 나타내었다. 이 평균값은 PST를 설치한 후 모든 선로에 $n-1$ 의 상정사고를 적용하여 연계선로의 조류의 평균을 계산한 것이다. 이러한 선로에 PST를 설치하여 비상사태시 연계선로에 흐르는 전력조류를 증대시킬 수 있으며 융통전력 또한 증가시킬 수 있다. 표 4.2는 PST 설치전과 후의 연계선로의 조류 변화와 융통전력을 나타낸 것이다.

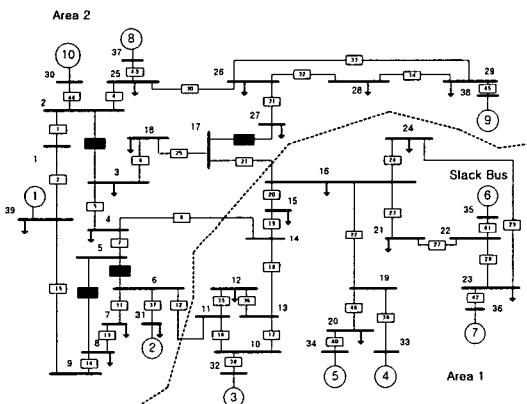


그림 4.1 10기 39모선 계통도

Fig. 4.1 10 machines and 39 buses systems

표 4.1 최적의 PST 설치 위치

Table 4.1 Optimal PST Installation Location

	PST 설치위치 (from - to)	연계선로 조류의 평균[MW]
1	17 - 27	893.68
2	5 - 6	893.62
3	2 - 3	893.60
4	5 - 8	893.07

표 4.2 PST 설치전과 후의 융통전력과 연계선로 조류
Table 4.2 ATC and Tie-line flow of with and without PST

PST 설치위치 (17 - 27)	Tie-Line Flow[MW]	ATC [MW]	PST 설치선로의 전력조류[MW]
without PST	1,286.7	400.4	21.0
with PST	1,309.7	420.9	134.6

5. 결 론

본 연구에서는 위상변환기(phase-shifting transformer : PST)를 도입하여 계통 혼잡처리를 위한 계통 연계선로의 융통전력을 증가시킬 수 있는 최적의 PST 설치위치와 알고리즘을 개발함으로써 선로혼잡에 대하여 분석하고 해소할 수 있는 방안을 제시하였다.

향후 연구로는 PST와 발전출력 하이브리드 제어에 의한 계통 혼잡처리를 함으로써 계통의 비상사태시 복상조류의 융통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초 전력연구원 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. Ejebu, 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] V. Ajjarapu, 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.
- [6] C. T. Lawrence and A. L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996.