

선형계획법을 이용한 총송전용량 평가

김규호* 송경빈**
*안산공과대학 **송실대학교

Assessment of Total Transfer Capability using Linear Programming

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

Abstract - This paper presents a scheme to solve the congestion problem with phase-shifting transformer(PST) and power generation using linear programming method. 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. linear programming 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

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 복상조류의 유통전력을 향상시킬 수 있다[1]. 특히, 위상변환기는 계통전압의 위상각을 변화시켜서 계통의 전력조류를 변화시킬 수 있는 것으로서 대규모 송전계통에서 효율적인 운영을 위한 방법으로 사용되고[2,3], 확률론적 방법을 이용하여 총송전용량을 계산하는 방안도 제시되었다[4]. 또한, 계통의 과도안정도를 향상시키기 위하여 위상변환기를 사용하는 연구가 진행되었으나 실질적인 응용은 이루어지지 않았다[5].

본 논문에서는 선형계획법을 이용하여 위상변환기(PST)와 발전출력을 제어함으로써 계통의 비상사태시 복상조류의 유통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립함으로써 선로혼잡에 대하여 분석하고 해소할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 문제의 정식화

2.1 선형계획법 응용을 위한 선형화

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

$$Max. \sum_{i=1}^T P_i \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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

$$\psi'_{min} \leq \psi' \leq \psi'_{max}$$

$$P_{Li} = P_{Li0} (1 + \lambda K_{Pi})$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} (1 + \lambda K_{Qi})$$

여기서,

ψ' : 위상변환기의 위상각, ψ'_{max}, ψ'_{min} : 위상변환기 위상각의 상하한치

나머지 식에 대한 설명은 식 (5.1)과 같으며, 식 (5.1)에서 $\lambda = 0$ 인 기준 사례로부터 $\lambda = \lambda_{max}$ 가 되는 경우 까지 ψ', P_{GS} 와 P_{Li0}, Q_{Li0} 를 최적화시킨다. $\lambda = \lambda_{max}$ 인 경우 TTC가 결정된다.

- 목적함수

연계선로의 조류식은 모선전압의 위상각, 모선전압의 크기, 부하증가 파라미터, 위상변환기 위상각 및 공급지역의 발전기 유효전력출력의 함수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 공급지역에서 수요지역으로의 전력을 비상시에 최대로 전달하는 것이므로 연계선로를 통하여 전달되는 전력을 최대로 하는 것을 목적으로 하였다.

$$f_{ij} = (V_i/t_{ij})^2 (g_{ij} \cos \psi' - b_{ij} \sin \psi') - (V_i/t_{ij}) V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \psi') g_{ij} \quad (2.2)$$

$$- (V_i/t_{ij}) V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \psi') b_{ij}$$

$$i \in Source Area$$

$$j \in Sink Area$$

식 (2.2)를 모선전압의 위상각, 모선전압의 크기, 부하증가 파라미터, 위상변환기 위상각 및 공급지역의 발전기 유효전력출력에 대하여 선형화 하면 식 (2.3)과 같이 된다.

$$\Delta f_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{ij}}{\partial V} & \frac{\partial f_{ij}}{\partial \lambda} & \frac{\partial f_{ij}}{\partial \psi'} & \frac{\partial f_{ij}}{\partial P_{GS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ \Delta \psi' \\ \Delta P_{GS} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

여기서, 각 변수에 대한 목적함수의 감도는 다음과 같다.

$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \theta}$: 모선전압의 위상각에 대한 연계선로조류 감도정수

$\frac{\partial f_{ij}}{\partial V}$: 모선전압의 크기에 대한 연계선로조류 감도정수

$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \lambda}$: 부하증분에 대한 연계선로조류 감도정수

$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \psi'}$: 위상변환기의 위상각에 대한 연계선로조류 감도정수

$\frac{\partial f_{ij}}{\partial P_{GS}}$: 발전기 유효전력출력에 대한 연계선로조류 감도정수

- 등식제약 조건

식 (2.1)의 등식제약 조건에 대한 선형화는 뉴턴-랩슨법을 이용한 조류 계산의 수정방정식 처럼 각 변수에 대하여 테일러 전개하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} & \frac{\partial P}{\partial \psi'} & \frac{\partial P}{\partial P_{GS}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} & \frac{\partial Q}{\partial \psi'} & \frac{\partial Q}{\partial P_{GS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ \Delta \psi' \\ \Delta P_{GS} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

다음의 모선 i 와 j 사이의 어드미턴스, 유효전력 및 무효전력에 대한 전력방정식 그리고 수정방정식을 이용하여 각각의 감도를 상세히 나타낼 수 있다.

$$J_{P\lambda} = \frac{\partial P}{\partial \lambda} = P_{Di} \quad (2.5)$$

$$J_{Q\lambda} = \frac{\partial Q}{\partial \lambda} = Q_{Di} \quad (2.6)$$

$$J_{PP\alpha} = \frac{\partial P}{\partial P_{GS}} = -1.0 \quad (2.7)$$

$$J_{QP_{GS}} = \frac{\partial Q}{\partial P_{GS}} = 0 \quad (2.8)$$

- 부등식제약 조건

제어 및 상태변수에 대한 상하한치는 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{i,\min} &\leq V_i \leq V_{i,\max} \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda \leq \lambda_{\max} \\ \psi'_{\min} &\leq \psi' \leq \psi'_{\max} \\ P_{GS,\min} &\leq P_{GS} \leq P_{GS,\max} \\ S_{ij} &\leq S_{ij,\max} \end{aligned} \quad (2.9)$$

식 (2.9)를 증분형태로 하면 식 (2.10)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{i,\min} &\leq \Delta V_i \leq \Delta V_{i,\max} \\ \Delta \lambda_{\min} &\leq \Delta \lambda \leq \Delta \lambda_{\max} \\ \Delta \psi'_{\min} &\leq \Delta \psi' \leq \Delta \psi'_{\max} \\ \Delta P_{GS,\min} &\leq \Delta P_{GS} \leq \Delta P_{GS,\max} \\ \Delta S_{ij} &\leq \Delta S_{ij,\max} \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta V_{i,\max} &= V_{i,\max} - V_i & \Delta V_{i,\min} &= V_{i,\min} - V_i \\ \Delta \lambda_{\max} &= \lambda_{\max} - \lambda & \Delta \lambda_{\min} &= \lambda_{\min} - \lambda \\ \Delta \psi'_{\max} &= \psi'_{\max} - \psi' & \Delta \psi'_{\min} &= \psi'_{\min} - \psi' \\ \Delta P_{GS,\max} &= P_{GS,\max} - P_{GS} & \Delta P_{GS,\min} &= P_{GS,\min} - P_{GS} \end{aligned} \quad (2.11)$$

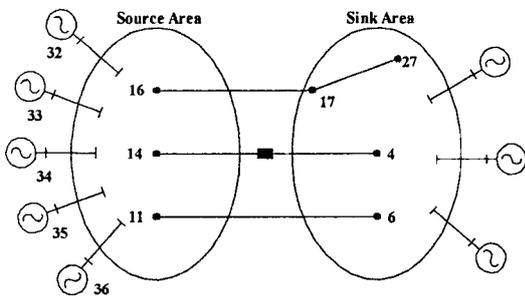
각각의 선로조류에 대한 제약조건을 선형화하면 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\begin{array}{ccccc} \frac{\partial S_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial S_{ij}}{\partial V} & \frac{\partial S_{ij}}{\partial \lambda} & \frac{\partial S_{ij}}{\partial \psi'} & \frac{\partial S_{ij}}{\partial P_{GS}} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ \Delta \psi' \\ \Delta P_{GS} \end{bmatrix} \leq [S_{ij,\max} - S_{ij,flow}] \quad (2.12)$$

3. 사례연구

본 논문에서는 선형계획법을 이용하여 위상변환기와 발전출력 제어에 의하여 연계선로의 전력조류를 변화시켜 총송전용량을 증가시키는 방안을 제안하였다.

그림 3.1에 제시된 IEEE 10기 39모선 모델계통에 적용하여 총송전용량을 증가시켰다.



<그림 3.1> 간략화한 10기 39모선 계통도
<Fig 3.1> Simplified 10 machines and 39 buses systems

<표 3.1> 부하중분계수만을 이용한 총송전용량의 비교

	반복조류계산법 (RPF)	비선형최적화기법 (SQP)	선형계획법 (LP)
총송전용량 (TTC) [MW]	1007.734	1007.736	1007.737
CPU Time [sec.]	39	5	1

<표 3.2> 하이브리드제어 전후의 연계선로 조류변화

	PST/ angle [deg]	TTC [MW]
Pre-Control of PST	-	1007.73
	PST를 모선 4 - 모선 14 사이에 설치시, 제어각 $\approx 0.43^\circ$	1061.71
	PST를 모선 17 - 모선 16 사이에 설치시, 제어각 $\approx 2.07^\circ$	1061.84
Post-Control of PST	PST를 모선 4 - 모선 14 사이에 설치시, 제어각 $\approx 0.08^\circ$ 그리고 PST를 모선 17 - 모선 16 사이에 설치시, 제어각 $\approx 1.68^\circ$	1061.85

<표 3.3> 하이브리드제어 전후의 연계선로 조류변화

	PST/ angle [deg]	Real Power of Generation Control Buses [MW]	TTC [MW]
		32, 33, 34, 35, 36	
Pre-Control of PST and Real Power Generation [MW]	-	670.3, 651.7, 523.9, 1021.5, 577.8	1007.73
	PST를 모선 4 - 모선 14 사이에 설치시 제어각 $\approx 0.89^\circ$	618.9, 850.0, 688.0, 1082.8, 485.7	1275.73
Post-Control of PST and Real Power Generation [MW]	PST를 모선 4 - 모선 14 사이에 설치시 제어각 $\approx 1.80^\circ$ 그리고 PST를 모선 17 - 모선 16 사이에 설치시 제어각 $\approx 4.23^\circ$	748.2, 727.8, 604.0, 1121.6, 527.4	1286.00

4. 결 론

본 논문에서는 선형계획법을 이용하여 위상변환기(phase-shifting transformer : PST)와 발전출력을 제어함으로써 계통의 비상사태시 부상조류의 용통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립하였다.

위상변환기와 발전기출력을 제어함으로써 수요지역(sink area)의 부하중가에 대하여 공급지역(source area)으로부터 연계선로를 통하여 더 많은 전력을 전달할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 이용한 선형계획법의 결과와 반복조류계산(RPF) 및 비선형최적화기법(SQP)을 이용한 결과를 비교하였다.

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.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [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] 김규호, 송경빈, "계통 혼잡처리를 위한 Phase-Shifting Transformers의 최적 위치 선정", 대한전기학회 논문지, 제54권 12호, pp.567-572, 2005년 12월
- [4] 박진욱, 김규호, 송경빈, 김진오, 신동준, "불확실한 날씨 상태를 고려한 확률론적 방법의 총 송전용량 평가", 대한전기학회 논문지, 제55권 1호, pp.45-51, 2006년 1월
- [5] 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