

최적조류계산을 기초로한 총송전용량 결정

김규호* 송경빈** 이상봉*** 이상근****
 *안산공과대학 **송실대학교 ***성균관대학교 ****강릉대학교

Total Transfer Capability Based on Optimal Power Flow

Kyu-Ho Kim* Kyung-Bin Song** Sang-Bong Rhee*** Sang-Keun Lee****
 *Ansan College of Technology **Soongsil University ***Sungkyunkwan University **Kangnung University

Abstract - This paper presents a method for the determination of total transfer capability in interconnected power systems, which is based on sequential quadratic programming (SQP). The objective function is the maximization of the interconnected line flow. To calculate TTC the control variables are the active power of the generating units, the voltage magnitude of the generator, transformer tap settings and SVC setting. The state variables are the bus voltage magnitude, the reactive power of the generating unit, line flows and the tie line flow.

The method proposed is applied to the modified IEEE 14 buses model system.

1. 서 론

전력시장의 효율적 운영을 위해서는 송전선로에 대한 비차별적 접속이 보장되어야 하며 이를 위해 전력 거래시스템을 통해 정확한 총송전용량 (Total Transfer Capability : TTC) 정보가 제공되어야 한다. 또한 우리나라의 부하의 상당부분이 경인지역에 집중되어 있고, 남·서부 해안의 대용량 발전소에서 경인지역의 부하를 담당하기 위해 장거리 송전이 이루어지고 있는 현실에서 선로의 TTC를 정확하게 계산하는 작업은 전력시장의 효율성과 신뢰도 유지를 위해 필수적인 선행 작업이라 할 수 있다.

본 논문에서는 최적조류계산을 기초로 최적화기법을 이용하여 계통의 비상사태시 북상조류의 유통전력을 향상시키기 위한 방안을 수립하였다.

2. 문제의 정식화

2.1 목적함수

인접한 공급지역(source area)과 수요지역(sink area)을 연결하고 있는 연계선로의 전력조류를 증가시켜 수요지역으로의 전력공급을 증가시키기 위하여 다음과 같이 정식화할 수 있다. 연계선로의 조류식은 모선 전압의 위상각, 모선전압의 크기, 부하증가 파라미터 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.

$$\begin{aligned} \text{Max. } f_{ij} &= (V_i/t_{ij})^2 - (V_i/t_{ij})V_j \cos(\theta_i - \theta_j)g_{ij} - (V_i/t_{ij})V_j \sin(\theta_i - \theta_j)b_{ij} \\ & \quad i \in \text{Source Area} \\ & \quad j \in \text{Sink Area} \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.2 등식제약 조건

식 (2.2)는 기준상태에서 계통전체에 대한 유효전력 밸런스와 무효전력 밸런스로서 조류계산 만족에 대한 등식제약조건이다.

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2.2)$$

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

식 (2.2)에서 부하를 모선의 부하증가를 표현하는 λ 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{Li} = P_{Li0} (1 + \lambda K_{P_i}^L) \quad (2.3)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} (1 + \lambda K_{Q_i}^L)$$

식 (2.3)에서 $\lambda = 0$ 인 기준상태로부터 제약조건을 만족하면서 $\lambda = \lambda_{\max}$ 가 될 때 까지 최적화시키면 TTC가 결정된다.

2.3 부등식제약 조건

총송전용량 증대를 위한 제어변수와 상태변수에 대한 상하한치는 각각 식 (2.4), 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

제어변수

최적화 방법이나 알고리즘에 의해 정해지거나 제어되는 변수를 나타내며 각 발전기의 발전기 유효전력 출력과 각 발전기의 전압크기, 변압기 탭비, 병렬콘덴서 및 리액터 등과 같은 무효전력원이 이에 속한다.

$$0 \leq \lambda \quad (2.4)$$

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

$$V_G^{k,\min} \leq V_G^k \leq V_G^{k,\max}$$

$$T_{ap}^{k,\min} \leq T_{ap}^k \leq T_{ap}^{k,\max}$$

$$Q_{cr}^{k,\min} \leq Q_{cr}^k \leq Q_{cr}^{k,\max}$$

상태변수

상태변수는 슬랙모선의 유효전력출력, 발전기 모선의 무효전력출력, 각 모선에서의 전압크기 및 선로정격용량이 된다. 제약조건은 TTC를 결정된 후에 얻은 계통의 최적 운전점에 있어서 만족하여야 한다.

$$P_{G,slack}^{\min} \leq P_{G,slack} \leq P_{G,slack}^{\max} \quad (2.5)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G \leq Q_G^{\max}$$

$$V_L^{\min} \leq V_L \leq V_L^{\max}$$

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

3. Sequential Quadratic Programming

순차적2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)은 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다. 기본적인 알고리즘 구성은 라그랑제 함수의 헤시안 행렬을 사용하며 QP와 line search 등의 여러 가지 탐색 방법이 조합된 탐색 기법이다[10]. SQP는 실현 가능한 초기해를 기반으로 라그랑제 함수의 헤시안 행렬을 구성하고 이 헤시안 행렬을 이용해 QP를 해석함으로써 탐색 방향을 결정한다. SQP에서 탐색방향 및 step size는 여러 가지 방법을 조합해서 사용하므로 목적함수, 제약식의 형태에 따라 다양하게 사용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 방법은 line search (monotone, nonmonotone line search) 및 Armijo type arc search를 사용하였다. 계산된 탐색 방향은 목적함수를 감소시키는 방향으로 진행하며 모든 제약식을 만족한다. SQP 방법의 일반적인 알고리즘 구성을 요약하면 다음과 같이 3단계로 구성된다.

절차 1 : 초기화(initialize)

- i) 변수 x_0 , 탐색방향 d_0 , step size t_0 가 실행불가능 영역의 초기값 일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(search)

- i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산함으로써 탐색 방향을 결정한다.
- ii) 목적함수와 등식, 부등식의 모든 제약을 만족하는 step size를 결정한다.

절차 3 : 반복계산(update)

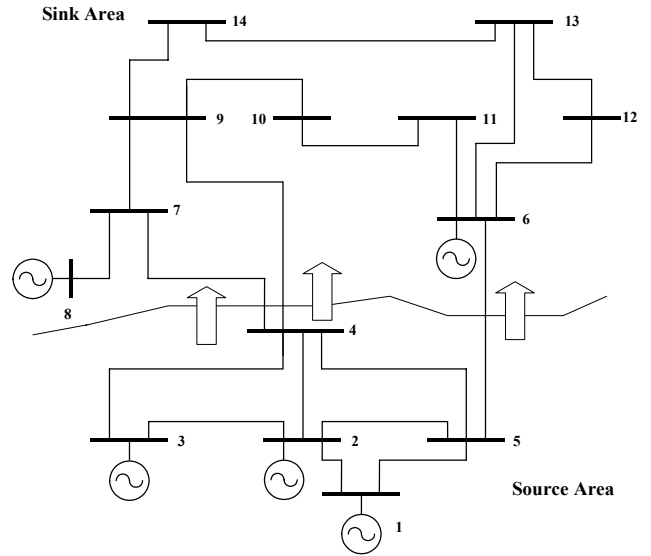
- i) 헤시안 행렬 업데이트.
- ii) $x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \tilde{d}_k$, 여기서 t_k 는 k 번째 step size, d_k 는 k 번째 탐색 방향, \tilde{d}_k 는 d_k 를 사용해 얻어지는 QP 문제의 해
- iii) 제약식을 포함한 라그랑제 문제의 해석

$$\min \left\| \sum_{j=1}^{n_f} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^{t_i} \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{t_e} \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{t_e} \nu_j \nabla h_j(x_{k+1}) \right\|^2 \quad (3.1)$$

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

4. 사례연구

본 논문에서는 최적화기법을 이용하여 연계선로의 전력조류를 변화시켜 총송전용량을 증가시키는 방안을 제안하였다. 그림 4.1은 IEEE 14 모션 모델계통을 나타낸 것이다.



<표 3.2> 부하증분계수 λ 만을 이용한 총송전용량 계산

	반복조류계산법 (RPF)	비선형최적화기법 (SQP)
총송전용량 (TTC) [MW]	163.53	163.53
CPU Time [sec.]	11	1

4. 결 론

본 논문에서는 최적조류계산을 기초로한 총송전용량 결정을 위하여 최적화기법을 이용하는 방안을 제시하였다.

공급지역(source area)의 유효전력출력뿐만 아니라 최적조류계산을 위한 제어변수까지 포함하여 제어함으로써 계통의 비상사태시 복상조류의 유효전력을 향상시키기 위한 방안을 수립하였다.

최적조류계산 제어변수를 제어함으로써 수요지역(sink area)의 부하 증가에 대하여 공급지역(source area)으로부터 연계선로를 통하여 더 많은 전력을 전달할 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후 연구로는 연계지역의 가용송전용량(ATC)을 계산함으로써 계통의 혼잡을 원활히 처리할 수 있는 기법이 필요한 것으로 사료된다.

[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

<표 3.1> OPF 제어변수를 이용한 총송전용량의 계산

	부하증분계수 λ 만 이용	OPF 제어변수 이용
TTC [MW]	163.53	166.33
Source Area PG [MW]	304.92	311.61
Sink Area PG [MW]	40.0	40.0
Source Area PD [MW]	131.3	131.3
Sink Area PD [MW]	199.62	201.97
System Losses [MW]	14.00	18.33