

연계계통에 있어서 최적전력조류 변수를 이용한 가용송전용량 결정

김규호<sup>\*</sup> 송경빈<sup>\*\*</sup> 이상봉<sup>\*\*\*</sup> 이상근<sup>\*\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>한경대 <sup>\*\*</sup>승실대 <sup>\*\*\*</sup>성균관대 <sup>\*\*\*\*</sup>강릉대

Total Transfer Capability Based on Optimal Power Flow

Kyu-Ho Kim<sup>\*</sup> Kyung-Bin Song<sup>\*\*</sup> Sang-Bong Rhee<sup>\*\*\*</sup> Sang-Keun Lee<sup>\*\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>Hankyong Univ. <sup>\*\*</sup>Soongsil Univ. <sup>\*\*\*</sup>Sungkyunkwan Univ. <sup>\*\*\*\*</sup>Kangnung Univ.

**Abstract** - 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 available transfer capability(ATC) calculation and analyzes the results of ATC by using several variables of optimal power flow.

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

가용송전용량(ATC)를 결정하는데 있어 선행되어야 하는 요소는 총송전용량, 송전신뢰도 여유도(Transmission Reliability Margin : TRM) 및 설비편익 여유도(Capacity Benefit Margin : CBM)이다. 이것으로부터 가용송전용량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$ATC = TTC - TRM - CBM(\text{현재사용량 포함}) \quad (1.2)$$

본 연구에서는 연계선로를 포함함 모든 선로의 열용량 제약과 전압안정도 제약인 전압 제약조건을 고려하여 최적전력조류 변수를 이용하여 ATC를 평가하였다.

1. 서 론

최근 전력산업은 구조개편에 의하여 전력회사는 이익을 높이려는 시장논리에 따라 발전기 및 송전선로 등을 운영하게 되었다. 결국, 송전선로를 안전하게 운용하면서 상업적으로 효율성을 높이기 위하여 그림 1과 같이 연계선로(Tie-Line)에 있어서 기존에 사용하고 있는 송전용량에 추가적으로 사용할 수 있는 용량을 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)이라고 한다[1-3].

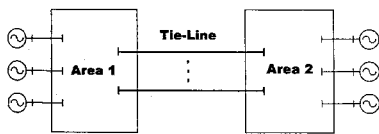


그림 1 연계계통

전력시장의 효율적 운영을 위해서는 송전선로에 대한 비차별적 접속이 보장되어야 하며 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 현실이다. 따라서 TTC는 한 지역에서 다른 지역으로 계통 안전도의 위반 없이 안전하게 송전할 수 있는 총송전용량으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TTC = \text{Min. of (Thermal, Voltage, Stability Limit)} \quad (1.1)$$

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 모션전압의 위상각, 모션전압의 크기, 부하증가 파라미터 및 공급지역의 발전기 유효전력출력의 함수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 공급지역에서 수요지역으로의 전력을 비상시에 최대한 전달하는 것이므로 연계선로를 통하여 전달되는 전력을 최대한으로 하는 것을 목적으로 하였다[4].

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

2.2 등식제약 조건

식 (2.2)는 기준상태에서 계통전체에 대한 유효전력과 무효전력에 대한 등식제약조건이다[4].

$$\begin{aligned} P_{\alpha} - P_{L\alpha} - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) &= 0 \quad (2.2) \\ Q_{\alpha} - Q_{L\alpha} - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) &= 0 \end{aligned}$$

식 (2.2)에서 부하를 모선의 부하증가를 표현하는  $\lambda$ 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

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

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

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

### 2.3 부등식제약 조건

총송전용량 증대를 위한 제어변수와 상태변수에 대한 상하한치는 식 (2.4)와 식 (2.5)와 같이 나타내었다[4].

#### 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.

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

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

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

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

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

#### 상태변수

상태변수는 슬랙모선의 유효전력출력, 발전기 모선의 무효전력출력, 각 모선에서의 전압크기 및 선로정격용량이 된다. 제약조건은 TTC를 결정한 후에 얻은 계통의 최적 운전점을 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 가능

한 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 초기값일 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)  $x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \bar{d}_k$ , 여기서  $t_k$ 는  $k$ 번째 step size,  $d_k$ 는  $k$ 번째 탐색 방향,  $\bar{d}_k$ 는  $d_k$ 를 사용해 얻어지는 QP 문제의 해

iii) 제약식을 포함한 라그랑제 문제의 해석

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

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

## 4. ATC 결정

### 4.1 TRM 및 ATC 계산

TRM은 계통 상태에 있어 고유의 불확실성을 고려한 것으로 운영상의 유연성을 확보함으로써 계통상태의 변화로부터 안전하게 계통을 운영할 수 있도록 한다. 그러므로 TRM을 고려하기 위해서는 계통에서 발생 가능한 모든 경우를 고려해야만 한다.

TRM을 결정하는 과정은 그림 2와 같이 Base case TTC와 고려할 수 있는 모든 경우의 TTC를 계산한다. Base case TTC와 가장 작은 TTC의 차이가 TRM이 된다. ATC는 식 (1.2)과 같이 Base case의 TTC에서 TRM을 제외한 값, 즉 가장 작은 값을 갖는 TTC가 ATC가 된다[3].

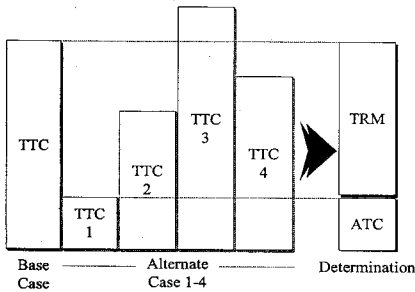


그림 2 여러 가지 경우로부터의 TRM 결정

#### 4. 사례연구

본 연구에서는 최적전력조류 변수들을 고려하여 가용송전용량을 계산하였고, 각각의 제약조건이 ATC에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 3은 IEEE 14 모선 모델계통을 나타낸 것이다.

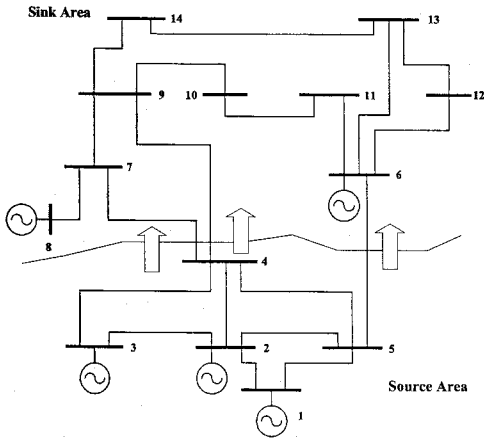


그림 3 모델계통

표 4.1 OPF 제어변수를 이용한 총송전용량의 계산

	부하증분계수 $\lambda$ 만 이용	OPF 제어변수 이용
System PD [MW]	164.78	168.60
Sink Area PG [MW]	308.76	310.08
Sink Area PD [MW]	40.0	40.0
Source Area PD [MW]	131.3	131.3
System ATC [MW]	203.08	206.97
System TRM [MW]	14.38	11.8

수요지역의 부하증가에 대하여 공급지역에서 전력을 공급하는 것으로 하였다. 표 4.1은 OPF 제어변수를 이용한 경우와 부하증분계수 만을 이용한 경우의 총송전용량을 비교한 것이다. ATC 계산에 있어 CBM은 고려하지 않았으며, TRM은 기준상태(Base case)의 TTC에서 가장 작은 TTC 레벨을 빼는 것으로 하였다. 다수의 선로사고 그

리고 연계선로의 사고가 발생한 경우에 대하여 TTC를 계산하였으며 결과는 표 4.2에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 가장 작은 TTC 레벨은 모선 4 - 5의 선로사고이며, 기준상태의 TTC에서 빼 것이 TRM이다. 또한, 가장 작은 TTC가 ATC가 된다. CBM을 고려하지 않았기 때문에 ATC가 너무 크게 평가된 것이며 이것은 실제 전력 거래에 있어서 문제를 발생시킬 수도 있다.

표 4.2 CPF와 SQP에 의한 TRM과 ATC 비교

상정사고	TTC[MW]	TRM[MW]	ATC[MW]
기준상태 지역 1	168.60	66.07	102.53
모선 2-3 선로사고	163.86		
모선 3-4 선로사고	164.13		
모선 4-5 선로사고	145.41		
모선 4-7 선로사고	115.89		
모선 4-9 선로사고	145.26		
모선 5-6 선로사고	102.53		
모선 10-11 선로사고	168.59		
모선 12-13 선로사고	163.618		
모선 13-14 선로사고	165.79		

#### 4. 결 론

본 논문에서는 최적전력조류 변수를 이용하여 가용송전용량을 결정하는 방안을 제시하였다.

공급지역(source area)의 유효전력출력뿐만 아니라 최적조류계산을 위한 제어변수까지 포함하여 제어함으로써 수요지역(sink area)의 부하증가에 대하여 공급지역(source area)으로부터 연계선로를 통하여 더 많은 전력을 전달할 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후 연구로는 최적전력조류를 기초로 연계지역의 가용송전용량(ATC)을 계산하는데 있어서 과도안정도에 관한 제약을 포함하여 평가하는 기법이 필요한 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제(2008T100100008)임.

#### [참고 문헌]

- [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, 박진욱, 김진오, 신동준, "전압제약을 고려한 가용송전용량 결정 및 분석", 대한전기학회 전력기술부문회 추계 학술대회 논문집, pp., 2004년 11월
- [4] 김규호, 송경빈, 이상봉, 이상근, "최적조류계산을 기초로한 총송전용량 결정", 대한전기학회 전력기술부문회 하계 학술대회 논문집, pp., 2008년 7월