

전압제약을 고려한 가용송전용량 결정 및 분석

김규호* 박진욱** 김진오** 신동준***
 안산공과대학* 한양대학교** 한국전기연구원***

ATC Determination and Analysis Considering Voltage Constraints

Kyu-Ho Kim* Jin-Wook Park** Jin-O Kim** Dong-Joon Shin***
 *Ansan College of Technology **Hanyang Univ. ***KERI

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 considering several constraints. Sequential quadratic programming(SQP) is used to calculate the ATC problem with state-steady security constraints. The proposed method is applied to 10 machines 39 buses model systems to show its effectiveness.

하는 요소는 총송전용량(Total Transfer Capability : TTC), 송전신뢰도 여유도(Transmission Reliability Margin : TRM) 및 설비편의 여유도(Capacity Benefit Margin : CBM)이다. 이것으로부터 가용송전용량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$ATC = TTC - TRM - CBM(\text{현재사용량 포함}) \quad (1)$$

여기서, 식 (1)의 각각의 용어를 설명하면 다음과 같다. TTC는 한 지역에서 다른 지역으로 계통 안전도의 위반 없이 안전하게 송전할 수 있는 최대 송전용량으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TTC = \text{Min. of } \{ \text{Thermal, Voltage, Stability Limit} \} \quad (2)$$

1. 서 론

최근 전력산업은 산업의 구조, 경영 및 운영에 있어서 급격한 변화를 맞이하고 있다. 기존의 단일전력회사 체계로 운영되던 전력산업을 발전, 송전 및 배전 등으로 세분함으로써 발전 및 판매에 경쟁을 유발시켜 소비자에 있어 고품질, 신뢰도 향상, 다양한 선택권, 저렴한 가격 등을 제공하고 계통의 효율성을 높이므로써 전력산업의 이익을 보장하는 것이다. 이러한 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 용량이 중요성을 띄게 되었다. 이 용량을 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)이라고 한다 [1-3].

계통 상황이 변화함에 따라 식 (2)의 세가지 제약조건도 변화하고 있으며, 세 제약조건 중 송전용량을 가장 제약하는 요소에 의해 총송전용량이 결정된다. 일반적으로 안정도 제약에 의해 가장 많이 제약을 받는 것으로 알려져 있다. TRM은 계통의 불확실성을 고려하여 전력계통의 안전한 운전을 보장하기 위해 필요한 여유용량이다. CBM은 연계계통에서 외부계통의 예비력 이용을 보장하여 발전설비 신뢰도 기준을 만족시키기 위해 필요한 여유용량이다.

ATC 등을 계산하는데 있어서 반복조류계산(RPF)과 연속조류계산(CPF)은 정확한 값을 계산할 수 있는 반면 계산시간이 과다하다[4]. 전력전달배분법(PTDF)과 이차함수 근사화(QFA)를 이용하여 ATC를 계산하는 기법이 개발되었다[5,6]. 또한, 최적화기법에 의해 빠르게 ATC를 계산하는 방안이 제시되었으며, 이 연구에서는 연계선로의 열용량(thermal limits)만을 제약으로 하였다[7].

본 연구에서는 연계선로를 포함함 모든 선로의 열용량 제약과 전압안정도 제약인 전압 제약조건을 고려하여 ATC를 계산하였으며, 각각의 제약조건이 ATC에 미치는 영향을 분석하였다. 계산방법은 순차적2차계획법(SQP)을 사용하였다.

제한한 ATC 계산 기법의 효용성을 입증하기 위하여 10기 39모선 계통에 적용하였다.

2. 총송전용량 계산

2.1 CPF를 이용한 총송전용량 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 TTC를 계산할 수 있는 방법이다[4]. CPF를 이용하여 TTC를

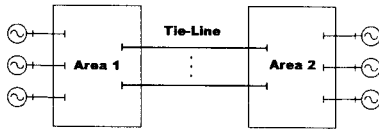


그림 1 연계계통

기존 송전용량이 송전되고 있는 상태를 Base case라 정의하며, 일반적으로 가용송전용량 계산은 계통운영자에 의하여 미리 선정된 상정사고 목록을 바탕으로 Base case 및 상정사고가 발생하였을 경우를 가정하여 각각 가용송전용량을 계산한다. 이중 가장 작은 경우의 송전용량을 최종적인 가용송전용량으로 결정하게 된다. 이러한 상정사고를 고려하는 과정을 통하여 안전도와 신뢰도를 보장하는 추가적인 전력거래가 가능해 진다.

가용송전용량(ATC)를 결정하는데 있어 선행되어야

결정하는 방법의 수학적 표현은 다음과 같다.

Max. λ

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

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

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

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

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

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 상하한치

TTC를 계산하기 위해 위 식을 목적함수 λ 의 식으로 나타내면

$$P_{Li} = P_{L0} (1 + \lambda K_{P_i})$$

$$Q_{Li} = Q_{L0} (1 + \lambda K_{Q_i}) \quad (4)$$

여기서,

P_{L0}, Q_{L0} : 모선 i 에서의 base case 주입전력량

K_{P_i}, K_{Q_i} : participation factor

위 식에서 $\lambda = 0$ 인 base case로부터 $\lambda = \lambda_{\max}$ 가 되는 경우까지 P_{L0}, Q_{L0} 를 증가시킨다. $\lambda = \lambda_{\max}$ 인 경우 TTC가 결정된다.

2.2 SQP를 이용한 총송전용량 계산

순차적2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)은 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다[8].

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 실현 불가능 영역의 초기값일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(search)

i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산하여 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 : k 번째 step size

d_k : k 번째 탐색 방향

\bar{d}_k : d_k 를 사용해 얻어지는 QP 문제의 해

iii) 제약식을 포함한 라그랑주 문제의 해석

$$\min \left\| \sum_{j=1}^{n_f} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^{l_1} \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{l_2} \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) + \sum_{j=0}^{l_3} \nu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) \right\|^2 \quad (10)$$

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

3. ATC 결정

3.1 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)과 같이 Base case의 TTC에서 TRM을 제외한 값, 즉 가장 작은 값을 갖는 TTC가 ATC가 된다[1].

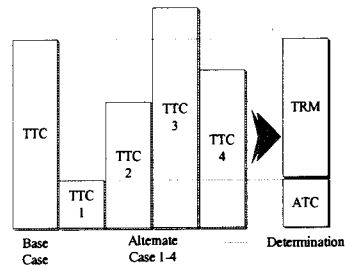


그림 2 여러 가지 경우로부터의 TRM 결정

4. 사례연구

본 연구에서는 여러 가지 제약조건을 고려하여 가용송전용량을 계산하였고, 각각의 제약조건이 ATC에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 3의 IEEE 10기 39모선 모델계통에 적용하여 제안한 ATC 계산 기법의 효율성을 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.

지역 2의 부하증가에 대하여 지역 1에서 공급하는 것을 원칙으로 하였으며, 본 논문에서는 지역 2의 모선 4에서 부하가 증가하고 지역 1의 발전기 모선 35에서 공급하는 것으로 하였다. 또한, ATC 계산에 있어 CBM은 고려하지 않았으며, TRM은 기준상태(Base case)의 TTC에서 가장 작은 TTC 레벨을 빼는 것으로 하였다. 각 지역에서 발전기 용량이 비교적 큰 발전기의 사

고, 다수의 선로사고 그리고 연계선로의 사고가 발생한 경우에 대하여 TTC를 계산하였으며 결과는 표 1에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 가장 작은 TTC 레벨은 모선 4 - 5의 선로사고이며, 기준상태의 TTC에서 한 것이 TRM이다. 또한, 가장 작은 TTC가 ATC가 된다. CBM을 고려하지 않았기 때문에 ATC가 너무 크게 평가된 것이며 이것은 실제 전력거래에 있어서 문제를 발생시킬 수도 있다. 참고문헌 [7]의 결과와 비교하면 참고문헌은 연계선로의 열용량만을 고려하였을 때의 ATC를 계산한 것이다. 이 경우 모선 4 - 14의 연계선로에서 제약(400MW)에 걸렸으며, TTC는 57.72였다. 그러나 본 논문에서는 모든 선로의 열용량과 전압제약을 고려하였을 경우는 지역 2의 모선 3 - 4의 선로에서 제약(150MW)에 걸렸으며 TTC는 37.54이다. 그러나 모선 4 - 14의 연계선로에는 389.3MW의 조류가 발생하였으며, 선로제약(400MW)에 대하여 여유는 있으나 다른 선로에서 제약에 걸리기 때문에 더 이상 지역 2로 송전할 수 없는 것이다.

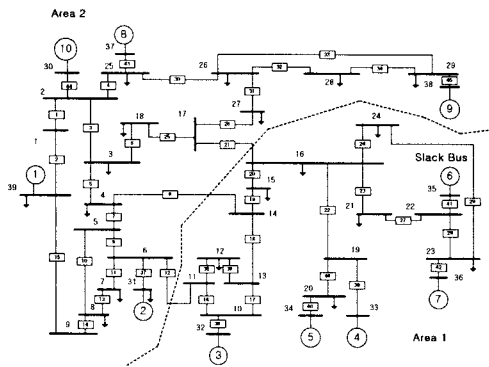


그림 3 10기 39모선 계통도

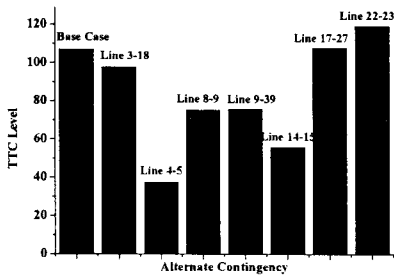


그림 4 여러 가지 상정사고에 대한 TTC 비교

표 1 CPF와 SQP에 의한 TRM과 ATC 비교

상정사고	CPF			SQP		
	TTC	TRM	ATC	TTC	TRM	ATC
기준상태 지역 1	107.05	69.55	37.50	107.08	69.54	37.54
모선 4-5 선로사고	37.50			37.54		

본 연구에서와 같이 제약조건을 고려한 경우에도 참고 문헌의 결과처럼 SQP와 CPF를 이용했을 때 ATC의 결과는 표 1에서 알 수 있듯이 거의 같다.

5. 결론

본 연구에서는 연계선로를 포함함 모든 선로의 열용량 제약과 전압안정도 제약인 전압 제약조건을 고려하여 ATC를 계산하였으며, 각각의 제약조건이 ATC에 미치는 영향을 분석하였다.

연계선로의 열용량만을 제약으로 고려했을 때 보다 모든 선로의 열용량과 전압제약을 고려하였을 때, ATC가 감소됨을 알 수 있다. 이것은 연계선로에 추가적으로 송전할 수 있는 여유는 있지만 다른 선로에서 제약에 걸리기 때문에 더 이상 다른 지역으로 송전할 수 없기 때문이다.

향후 연구로는 ATC 평가에 가장 큰 영향을 미치는 안정도 제약을 고려하여 더욱 정확한 ATC를 평가할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제(R-2004-B-221)임.

[참고문헌]

- [1] North American Electric Reliability Council (NERC), "Available Transfer Capability - Definitions and Determinations", NERC Report, June 1996.
- [2] P. W. Sauer, "Technical Challenges of Computing Available Transfer Capability (ATC) in Electric Power Systems", Proceedings, 30th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Jan. 1997.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] H. H. Yan, "PTDF and TLR from a Power Marketer's perspective", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol. 1, pp. 156-161. 1999.
- [6] 이효상, 신상현, 신동준, 김진오, "이차삼수 근사화를 이용한 가용송전용량과 송전신뢰 및 설비편익 여유도 산정", 대한전기학회 논문지, 제53A권, 제5호, pp.296-301, 2004
- [7] 김규호, 신동준, 김진오, 김태균, "배전계통의 신뢰도 향상을 위한 분산형전원의 설치 및 운영", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, A권, pp 183-185, 2004
- [8] C. T. Lawrence and A. L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996.