

발전비용을 고려한 가용 송전 능력(ATC) 증대 알고리즘 개발

이영호*, 백영식*, 송경빈**, 추진부***, 원종률***
 *경북대학교, **계명대학교, ***전력연구원

**Development of Available Transfer Capability Expansion Algorithm
 Considering Generation Cost**

Y. H. Lee*, Y. S. Baek*, K. B. Song** J. B. Chu*** J. R. Won***
 *Kyungpook National University, **Keimyung University, ***KEPRI

Abstract - 계통의 최적 조류 계산 (Optimal Power Flow)을 수행한 후, 계통 전체의 ATC(Available Transfer Capability)를 구한다. 이때 계통 전체의 ATC는 어느 특정한 선로의 ATC 값으로 결정되는데, 이 선로의 전력 조류량을 조금만 줄여도 전체 계통의 ATC가 크게 증가하게 되는 경우가 많다. 따라서 본 논문에서는 계통 전체의 ATC 증대를 위하여, ATC를 제한하게 되는 관심 선로의 조류에 각각의 발전기가 미치는 민감도와 각각의 발전기의 발전비용 함수를 동시에 고려한 최적의 발전력 재분배를 통하여 발전비용의 증가와 관심 선로의 전력 조류감소 효과의 최적화를 위하여 Linear Programming 기법을 이용한다.

전체 Power System에서 전력을 공급할 지역과 전력을 공급받을 지역을 결정하여 전체 송전 선로의 ATC를 구한다. 이때 전체 송전 선로의 ATC는 모든 선로의 ATC 중 가장 작은 값으로 결정된다. 이로 인하여 다른 선로에는 여유 용량이 비록 많이 있다 하더라도 어느 한 선로의 여유 용량이 부족하면 전체 송전 선로의 ATC도 작아진다. 이에 발전력의 재분배를 통하여 전체 송전선로의 ATC를 제한하게 되는 특정 선로의 조류를 감소시켜 그 선로와 전체 송전선로의 ATC를 증가시키고자 한다.

%PTDF는 Network Response Method에 구하고, 모선 i, j 사이 선로의 ATC는 의하여 아래 식에 의하여 결정되어진다.

1. 서 론

.ATC(Available Transfer Capability)는 송전선을 안정적으로 운용하면서도 상업적 이용을 더욱 확대하기 위하여, 기존의 사용하고 있는 용량에 더하여 추가적으로 송전에 사용할 수 있는 용량, 즉 송전 네트워크에 남아있는 송전 능력을 알 수 있게 해주는 측정단위로 이용되고 있다. 이는 전력시장이 경쟁 체제로 전환하면서 더욱 중요시되고 있다.

ATC = TTC - TRM - 현재 사용량(CBM 포함)
 TTC = MIN of {Thermal, Voltage, Stability Limit}

총 수송능력(Total Transfer Capability : TTC)은 주어진 계통운용 상황에서, 한 지역(일반적으로 독립 전력계통, 전력 풀, 제어 가능 지역, 혹은 이들의 일부분)에서 다른 지역으로 전력을 안정적으로(reliably) 전달하거나 수송할 수 있는 능력을 나타내는 수치로, 단위로 MW가 사용되고 있다. 일반적으로 수송 능력은 방향성을 가지고 있어, A 지역에서 B 지역으로의 수송 능력과 B 지역에서 A 지역으로의 수송 능력이 다르다. TTC의 결정은 계통의 조건, 주요 상정사고, 수송 능력 한계 등을 고려하여 결정된다.[2]

위의 정의에서 알 수 있듯이 ATC는 같은 송전 선로에서도 전력 조류의 변화나 사고의 발생, 전력을 공급하는 지역과 공급받는 지역의 변화 등으로 인하여 무수히 많은 경우의 수가 존재하게 된다. 이러한 각각의 경우에 대한 ATC는 새로이 결정되어야 한다.

송전 선로 전체의 ATC는 특정한 한 선로의 ATC로 인하여 크게 제한 받는 경우가 많다. 이에 본 논문에서는 전체 송전 선로의 ATC를 제한하게 되는 특정 선로의 ATC를 증가시켜 전체 송전 선로의 ATC를 증가시키고자 한다. 이를 위하여 선로의 민감도와 함께 각각의 발전기의 발전비용을 고려하여 발전비용의 증가와 기존 전력조류의 감소를 최적화 할 수 있는 발전력 재분배 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 본 론

$$ATC_{ij} = (S_{lim, ij} - S_{ij}) \times \frac{100}{\%PTDF_{ij}} \quad (1)$$

$S_{lim, ij}$: 모선 i, j 사이 선로의 용량 제한
 S_{ij} : 모선 i, j 사이 선로에 흐르고 있는 조류
 %PTDF_{ij} : 전체 전송량 중 ij 선로를 통하여 흐르는 %

%PTDF는 ATC를 구하고자 하는 시스템이 정상상태에서 한 지역에서 다른 지역으로 전력을 전송할 때 각각의 선로가 새로운 전력 전송량을 얼마나 분담하는가에 대한 factor이다.[3] 이 %PTDF는 선로에 기존 흐르고 있는 초기 전력조류와는 상관없이 전력을 공급하는 지역과 전력을 공급받는 지역이 결정되면 송전 네트워크의 연결상태와 물리적 성질에 의하여 결정된다.[4]

2.1 선로의 민감도

$P_{sen ij, k}$ 는 k 발전기의 발전량 변화에 대한 i, j 선로의 전력 조류의 민감도로 다음 식 (2)에서 (10)로 유도된다.

임의의 모선 i-j를 흐르는 전력에 대해서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F^{(i,j)} = [M^{(i,j)}]^T \{\delta\} \quad (2)$$

여기서 $F^{(i,j)}$ 는 선로 조류를 나타내는 벡터, $[M^{(i,j)}]^T$ 는 각 행의 i번째 열과 j번째 열에만 $1/x_{i,j}$ 와 $-1/x_{i,j}$ 값을 가지고 나머지는 모두 0 값을 가지는 행렬, $\{\delta\}$ 는 전압의 위상각을 나타내는 벡터이다.

다음으로, n 모선의 real power injection 과 전압 위상각과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\{\Delta P\} = [B] \{\Delta \delta\} \quad (3)$$

[B]행렬의 요소는 다음과 같다.

$$B_{k,l} = -\frac{1}{x_{k,l}} \text{ if } k \neq l$$

$$B_{k,k} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{x_{k,l}}$$

기준 모선 n을 선택 후 (3)번 식으로부터 기준 모선에 대한 상대적인 위상각을 얻을 수 있다.[4]

$$\{\Delta\delta_{-n}^{re}\} = [B_{-n}]^{-1} \{\Delta P_{-n}\} \quad (4)$$

(2)번과 (4)번 식을 조합하면,

$$F^{(i,n)} = [M^{(i,n)}]^T \left[\begin{array}{c|c} [B_{-n}]^{-1} & 0 \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \{\Delta P\} + \delta_n [M^{(i,n)}]^T \{1\} \\ = [D_n^{(i,n)}]^T \{\Delta P\} \quad (5)$$

두 번째항 $\delta_n [M^{(i,n)}]^T \{1\}$ 은 0이 된다.

(5)번식으로부터,

$$[D_n^{(i,n)}] = \left[\begin{array}{c|c} [B_{-n}]^{-1} & 0 \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right]^T [M^{(i,n)}] \quad (6)$$

기준 모션을 다르게 하면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$[D_n^{(i,n)}] - [D_m^{(i,n)}] = P_{m,n}^{(i,n)} \{1\} \quad (7)$$

$$P_{m,n}^{(i,n)} = D_n^{(i,n)}(m) = -D_m^{(i,n)}(n) \quad (8)$$

여기서 $D_n^{(i,n)}(m)$ 는 $[D_n^{(i,n)}]$ 행렬의 임의의 열벡터 $\{D_n^{(i,n)}\}$ 의 m 번째 값을 나타낸다.

(6), (7), (8)번식의 관계에서 임의의 선로에 대한 발전력 변화에 대한 민감도는 다음과 같다. [5]

$$\{D_n^{(i,n)}\} = \{D_n^{(i,n)}\} + P^{(i,n)} \{1\} \quad (9)$$

$$P^{(i,n)} = -\frac{D_n^{(i,n)}(i) + D_n^{(i,n)}(j)}{2} \quad (10)$$

2.2 발전비용 함수의 고려

각각의 발전기는 최적전류조류를 수행하고 있는 상태이므로 관심선로의 전력조류를 감소시키고자 발전력을 재분배한다면 총 발전비용은 증가할 수밖에 없다. 발전기의 발전비용 함수는 아래 식(11)과 같이 비선형의 2차식 형태로 주어진다.

$$Cost(G_k) = \{a_k + b_k(G_k) + c_k(G_k)^2\} \quad (11)$$

총 발전비용은 (Total Generation Cost : TGC) 각각의 발전기의 발전비용의 합으로 주어진다.

$$TGC = \sum_{k=1}^n Cost(G_k) \quad (12)$$

이때 발전력 재분배로 인한 총 발전비용의 증가분은 각각의 발전기의 발전비용 증가분의 총합과 같을 것이다.

$$\Delta TGC = \sum_{k=1}^n \{Cost(G_k) - Cost(G_{k0})\} \\ = \sum_{k=1}^n \{(b_k * G_k + c_k * G_k^2) - (b_k * G_{k0} + c_k * G_{k0}^2)\} \quad (13)$$

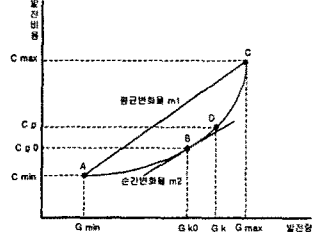
위의 식 (13)은 2차의 비선형 함수이다.

그러나 초기 발전량 G_{k0} 부근에서는 다음과 같이 미분계수(순간변화율, 접선의 기울기)를 이용하여 다음과 같이 1차식으로 선형화 할 수 있다.

$$\Delta TGC = \sum_{k=0}^n \{b_k + 2c_k G_{k0}\} \times \Delta G_k \quad (14)$$

발전비용의 증가를 최소로 하기 위하여 위의 식(14)을 최소화해야 한다. 비용함수의 계수 $(b_k + 2c_k G_{k0})$ 를 정규분포의 개념을 이용하여 변형한다.

즉 $(b_k + 2c_k G_{k0})$ 값은 평균변화율 (m_1)을 중심으로 분포하고 있을 것이므로, $(b_k + 2c_k G_{k0})$ 를 평균변화율 (m_1)로 나누면 "1"을 중심으로 0보다 큰 양수로 분포하게 될 것이다.



$$C_{inc,k} = \frac{\text{순간변화율}}{\text{평균변화율}} = \frac{b_k + 2c_k G_{k0}}{m_1} \quad (15) \\ m_1 = \frac{C_{max} - C_{min}}{G_{max} - G_{min}}$$

$C_{inc,k}$ 값에서 1을 빼면 0을 중심으로 분포하게 되고 그 값이 양수이면 발전량을 증가시킬 때 발전비용의 증가가 커지고 음수이면 발전량을 증가시킬 때 발전비용의 증가가 상대적으로 적다.

2.3 목적함수

선로의 민감도를 이용한 목적함수 1)은 식(1)으로부터 아래 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$ATC_{ij, new} = (S_{lim, ij} - S_{new, ij}) \times \frac{100}{\%PTDF_{ij}} \quad (16)$$

$$S_{new, ij} = S_{ij} + \sum_{k=1}^n P_{sen, ij, k} \cdot \Delta G_k$$

$$\Delta G_k = G_{new, k} - G_{k0}$$

- $S_{new, ij}$: ij 선로의 새로운 전력 조류량
- $P_{sen, ij, k}$: k 발전기의 발전량 변화에 대한 ij 선로의 민감도
- ΔG_k : k 발전기의 발전량 변화분
- $G_{new, k}$: k 발전기의 새로운 발전량
- G_{k0} : k 발전기의 기존의 발전량

또한 발전비용을 고려한 목적함수 2)는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{MIN} \left[\sum_{k=0}^n \left(\frac{b_k + 2c_k G_{k0}}{m_1} - 1 \right) \times \Delta G_k \right] \quad (17)$$

$$\text{MIN} \left[\sum_{k=0}^n (C_{inc, k} - 1) \times \Delta G_k \right]$$

이 두 목적함수를 가중상수 β 를 이용하여 선형적으로 결합하여 하나의 목적함수로 나타낼 수 있다.

목적함수

$$\text{MIN} \left[\sum_{k=1}^n \left\{ \left(P_{sen, ij, k} \cdot \frac{100}{\%PTDF_{i,j}} \right) + \beta \cdot (C_{inc, k} - 1) \right\} \times \Delta G_k \right] \quad (18)$$

등식 제약조건

$$\sum_{k=1}^n G_{new, k} = \sum_{k=1}^n G_{k0} \quad (19)$$

부등식 제약조건

$$ATC_{new, ij} > ATC_{ij} \\ G_{k, min} - G_{k0} \leq \Delta G_k \leq G_{k, max} - G_{k0} \quad (20)$$

위의 제약조건을 고려하여 Linear Programming 기법을 이용하여 목적함수를 최소화 하는 ΔG_k 를 구하였다. 하지만 전력을 공급하는 지역이나 공급받는 지역에 있는 발전기는 그 발전력을 기존의 발전력으로 고정하였다. 이는 전력을 공급하는 지역이나 공급받는 지역의 발전기의 발전력이 변화하게 되면 선로의 전력조류의 변화에 상관없이 ATC에 영향을 미치지 때문이다.

2.4 시뮬레이션을 통한 사례연구

위에서 제시한 목적함수와 제약조건을 이용하여 30모선, 발전기 6대인 간단한 시스템에 적용하였다.

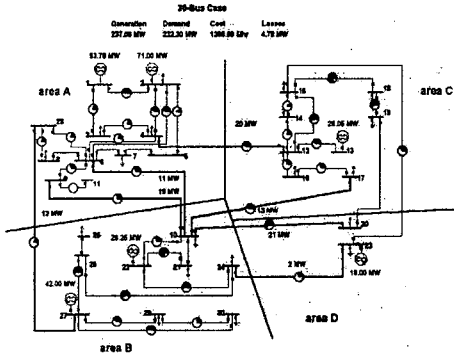


그림 1. ATC를 구하고자 하는 시스템

area A의 2번 모선에서 area D의 20번 모선으로의 ATC를 구해보면 아래 <표 1>과 같다.

	Trans Lim	Lim Element	%PTDF
1	10.68MW	Aera C Line from 15 to 18	30.71
2	20.93MW	Aera B Line from 10 to 20	63.92
3	22.70MW	Aera C Line from 18 to 19	29.82
4	62.16MW	Aera C Line from 15 to 12	-22.04

<표 1> 기존의 ATC

각각의 발전기 데이터와 모선15에서 모선18 사이의 민감도는 아래 <표 2>와 같다.

발전기	선로 민감도	Min MW	Max MW
G1	0.001	10	85
G2	-0.001	10	115
G13	0.096	10	100
G22	-0.059	5	45
G23	0.106	5	50
G27	-0.001	5	65

<표 2> 선로 민감도와 발전력 상 하한 제약

위의 표에서 알 수 있듯이 C지역의 15모선에서 18번

모선 사이의 제약으로 전체 계통의 ATC는 10.68MW로 제한되었다. 이에 선로의 민감도만을 고려한 경우와 선로 민감도와 함께 발전비용을 고려한 경우에 대하여 각각 발전력 재분배를 통하여 ATC를 증대한 것을 아래 <표 3>에 나타내었다.

발전기	OPF 수행후 발전력	선로민감도만 고려한 경우	선로민감도와 발전비용을 고려한 경우
G1	53.78	41	85
G2	71	71	71
G13	26.05	10	10
G22	26.25	45	45
G23	18.	5	5
G27	42	65	21
발전비용	1271.36 \$/hr	1367.31 \$/hr (7.54% 증가)	1356.10 \$/hr (6.67% 증가)
ATC	10.68 (from 15 to 18)	14.79 MW (38.48% 증가) (from 10 to 20)	14.75 MW (38.11% 증가) (from 10 to 20)

<표 3> 선로민감도만을 고려한 경우와 선로민감도와 발전비용을 동시에 고려한 경우

3. 결 론

송전 선로의 ATC는 어느 특정 선로로 인하여 제약이 발생하며, 이 선로의 각각의 발전기의 발전량 변화에 대한 민감도를 계산하고 동시에 각 발전기의 발전비용의 변화를 발전비용의 평균변화율에 대하여 정규화 하여 이 두가지를 동시에 고려함으로써 발전력 재분배 시에 선로의 전력 조류에 미치는 영향이 미미하면서도 발전비용의 증가가 큰 발전기의 발전량 증가를 억제함으로써 총 발전비용의 증가를 억제하면서도 ATC를 증대 하고자하는 관심선로의 전력 조류를 감소시킴으로서 원하는 전체 송전 네트워크의 ATC를 증대시킬 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 이영호, "가용 송전 능력(ATC)의 증대 방안에 대한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, p55~57, 2001
- [2] NERC, "Available Transfer Capability Definitions and Determination", 1996
- [3] Gabriel C. Ejebe, "Fast Calculation of Linear Available Transfer Capability", IEEE Transtions on Power Systems VOL.15 NO.3, 2000
- [4] Chin-Ning Yu, Marija D. Ilic, "Congestion Cluster-Based Markets for Transmission Management", Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting - Volume 2, p821-832, 1998
- [5] 임규형, "혼잡처리의 해외 사례 분석을 통한 한국전력시장에서의 혼잡처리 방안 모색", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p385~387, 2000
- [6] 하동완, "Multi-segment curve method를 이용한 선형 계획법 기반 최적 조류계산", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p200~202, 1999