

## 가용 송전 능력(Available Transfer Capability : ATC)의 증대 방안에 대한 연구

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

### Study for Increment Method of ATC (Available Transfer Capability)

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

**Abstract** - In this paper, algorithm for increment of ATC is proposed. ATC of the power transfer system is determined by the smallest ATC among transmission lines' in the power transfer system. So power flow of that transmission line shall be decreased to increase ATC, using the redistribution of each generation power with liner programing method. By the studying example case, 10~20% increment of ATC is confirmed in the power transfer system.

로의 ATC중 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.

모선  $i, j$  사이 선로의 ATC는 Network Response Method에 의하여 아래 식에 의하여 결정되어진다.

### 1. 서 론

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

ATC(Available Transfer Capability)는 송전선의 상업적 이용을 확대하기 위하여, 기존의 사용하고 있는 용량에 더하여 추가적으로 사용할 수 있는 용량, 즉 송전 네트워크에 남아있는 송전 능력을 알 수 있게 해주는 측정단위로 아래와 같이 정의된다.

$S_{lim, ij}$  : 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 %

$$ATC = TTC - TRM - \text{현재 사용량(CBM 포함)}$$

$$TTC = \text{MIN of } \{\text{Thermal, Voltage, Stability Limit}\}$$

$\%PTDF$ 는 ATC를 구하고자 하는 시스템이 정상상태에서 한 지역에서 다른 지역으로 전력을 전송할 때 각각의 선로가 새로운 전력 전송량을 얼마나 분담하는가에 대한 factor이다.[2] 이  $\%PTDF$ 는 선로에 기존 흐르고 있는 초기 전력조류와는 상관없이 전력을 공급하는 지역과 전력을 공급받는 지역이 결정되면 네트워크의 연결상태와 물리적 성질에 의하여 결정된다.  $\%PTDF$ 를 결정하기 위해서 먼저 ATC를 구하고자 하는 두 지역간에 임의로 일정량의 전력을 전송하여 각 선로간에 전력이 어떻게 분배되어 얼마나 증가하는가를 알아야 한다.

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, 단위로는 MW가 사용되고 있다. 일반적으로 수송 능력은 방향성을 가지고 있어, A 지역에서 B 지역으로의 수송 능력과 B 지역에서 A 지역으로의 수송 능력은 다르다. TTC의 결정은 계통의 조건, 주요 상정사고, 수송 능력 한계 등을 고려하여 아래와 같이 결정된다. 송전 수송 능력 여유도(Transmission Transfer Capability Margin)는 송전 신뢰 여유도(Transmission Reliability Margin : TRM)와 설비 편익 여유도(Capacity Benefit Margin: CBM)의 두 요소를 포함한다.[1]

$$\Delta P_{ij} = P_{ij, new} - P_{ij, old}$$

$$\%PTDF_{ij} = \frac{\Delta P_{ij}}{P_{increase}} \times 100$$

$P_{ij, old}$  :  $ij$  선로에 흐르고 있는 기존의 전력조류  
 $P_{ij, new}$  : ATC를 구하고자 하는 두 지역간에 임의로 전력 증가시  $ij$  선로에 흐르는 전력 조류  
 $P_{increase}$  : ATC를 구하고자 하는 두 영역간에 임의로 증가시킨 전력량

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.

위의 식(1)에서 관심 선로의 새로운 ATC는 아래와 같이 결정된다.

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 선로의 ATC를 증가시키고자 한다.

$$ATC_{ij} = (S_{lim, ij} - S_{new, ij}) \times \frac{100}{\%PTDF_{ij}} \quad (2)$$

$$S_{new, ij} = S_{ij} + \sum_{k=1}^n P_{sen, ij, k} \cdot \Delta G_k \quad (3)$$

$$\Delta G_k = G_{new, k} - G_k \quad (4)$$

$S_{new, ij}$  :  $ij$  선로의 새로운 전력 조류량  
 $P_{sen, ij, k}$  :  $k$  발전기의 발전량 변화에 대한  $ij$  선로의 민감도  
 $\Delta G_k$  :  $k$  발전기의 발전량 변화분  
 $G_{new, k}$  :  $k$  발전기의 새로운 발전량  
 $G_k$  :  $k$  발전기의 기존의 발전량

### 2. 본 론

#### 2.1 ATC의 증대 방안 제안

먼저 전체 Power System에서 전력을 공급할 지역과 전력을 공급받을 지역을 결정하여 전체 송전 선로의 ATC를 구한다. 이때 전체 송전 선로의 ATC는 모든 선

$P_{sen, ij, k}$ 는  $k$  발전기의 발전량 변화에 대한  $i, j$  선로의 전력 조류의 민감도로 다음 식 (5)에서 (13)로 유도

된다.

임의의 모선  $i-j$ 를 흐르는 전력에 대해서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F^{(i,j)} = [M^{(i,j)}]^T \{\delta\} \quad (5)$$

여기서  $F^{(i,j)}$ 는 선로 조류를 나타내는 벡터,  $[M^{(i,j)}]^T$ 는 각 행의  $i$ 번째 열과  $j$ 번째 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.

$$\{\Delta P\} = [B] \{\Delta \delta\} \quad (6)$$

$[B]$ 행렬의 요소는 다음과 같다.

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

$$B_{k,k} = \sum_{l=0}^n \frac{1}{x_{k,l}}$$

기준 모선  $n$ 을 선택 후 (6)번 식으로부터 기준 모선에 대한 상대적인 위상각을 얻을 수 있다. [3]

$$\{\Delta \delta_n^{re}\} = [B_{-n}]^{-1} \{\Delta P_{-n}\} \quad (7)$$

(5)번과 (7)번 식을 조합하면,

$$F^{(i,j)} = [M^{(i,j)}]^T \left[ \begin{array}{c|c} [B_{-n}]^{-1} & 0 \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] (\Delta P) + \delta_n [M^{(i,j)}]^T \{1\} \\ = [P_n^{(i,j)}]^T \{\Delta P\} \quad (8)$$

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

(8)번식으로부터,

$$[P_n^{(i,j)}] = \left[ \begin{array}{c|c} [B_{-n}]^{-1} & 0 \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right]^T [M^{(i,j)}] \quad (9)$$

기준 모선을 다르게 하면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$[P_n^{(i,j)}] - [P_m^{(i,j)}] = \beta_{m,n}^{(i,j)} \{1\} \quad (10)$$

$$\beta_{m,n}^{(i,j)} = P_n^{(i,j)}(m) - P_m^{(i,j)}(n) \quad (11)$$

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

(9),(10),(11)번식의 관계에서 임의의 선로에 대한 발전력 변화에 대한 민감도는 다음과 같다. [4]

$$\{P^{(i,j)}\} = \{P_n^{(i,j)}\} + \beta^{(i,j)} \{1\} \quad (12)$$

$$\beta^{(i,j)} = -\frac{P_n^{(i,j)}(i) + P_n^{(i,j)}(j)}{2} \quad (13)$$

위 식(2)에 식(3)과 식(4)를 대입하면 아래 식(14)를 얻을 수 있다.

$$ATC_{new ij} = [S_{lim ij} - S_{ij} + \sum_{k=0}^n P_{sen ij} \cdot G_k] \times \frac{100}{\%PTDF} \\ - [\sum_{k=0}^n P_{sen ij} \cdot G_{new k}] \times \frac{100}{\%PTDF} \quad (14)$$

여기서  $i, j$  선로의 새로운 ATC를 증가시키기 위해서 두 번째 항을 최소화하는 방향으로 각각의 발전기의 발전력을 재분배한다. 이때의 목적함수와 등식, 부등식 제약 조건은 다음과 같다.

$$\text{목적함수} \quad \text{MIN} \left( \left[ \sum_{k=0}^n P_{sen ij} \cdot G_{new k} \right] \times \frac{100}{\%PTDF} \right)$$

$$\text{등식 제약조건} \quad \sum_{k=1}^n G_{new ij} = \sum_{k=1}^n G_{ij}$$

$$\text{부등식 제약조건} \quad ATC_{new ij} > ATC_{ij}$$

위의 제약조건을 고려하여 Linear Programming 기법

을 이용하여 목적함수를 최소화 하는  $G_{new ij}$ 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.

## 2.2 시뮬레이션을 통한 사례 연구

위에서 제시한 방안을 이용하여 한 선로의 ATC를 증대하는 경우와 둘이상의 선로의 ATC를 고려하여야 하는 경우에 대하여 각각 적용하여 보았다.

### 2.2.1 한 선로에 대한 ATC 증대

IEEE 14모선 데이터를 이용하여 모선 2에서 13으로의 ATC를 구해보면 <표 1>과 같다. 선로의 용량과 발전기의 최대 출력과 최소 출력은 전력 조류량을 고려하여 임의로 정하였다.

<표 1> 2-13선로의 ATC

제한 선로	ATC	선로 용량	%PTDF
6-13 선로	47.21	50	60.16
5-6 선로	233.91	150	60.53
7-9 선로	319.77	100	23.05
2-4 선로	372.16	150	31.04

이 경우 송전 선로 전체의 ATC는 6-13선로의 54.06 MW로 결정된다. 6-13선로의 각각의 발전기에 대한 민감도와 발전기 용량 제약은 다음 <표 2>와 같다.

<표 2> 6-13선로의 민감도와 발전기 용량 제약

	6-13 선로의 민감도	발전기 용량 제약
G1	-0.005	100 ≤ P ≤ 300
G2	-0.007	30 ≤ P ≤ 150
G3	-0.012	20 ≤ P ≤ 100
G6	0.094	20 ≤ P ≤ 100
G8	-0.069	20 ≤ P ≤ 100

이에 발전력을 재분배하여 ATC를 구하면 아래<표 3>과 같다.

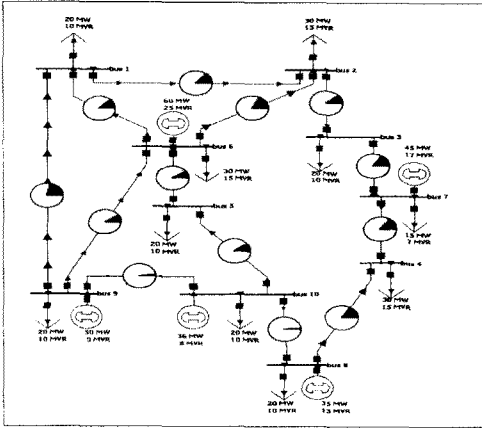
<표 3> 발전력 분배 전후의 선로조류와 ATC변화

	발전력 재분배 전	발전력 재분배 후	변화량(%)	
6-13 선로	전력조류	21.8	16.1	-26.15
	ATC	47.21	58.43	23.77
5-6 선로	전력조류	16.3	21.2	30.06
	ATC	233.91	221.47	-5.32
7-9 선로	전력조류	27.2	55.45	103.86
	ATC	319.77	192.63	-39.76
송전선로의 ATC	47.21	58.43	23.77	
G1	135	100		
G2	40	40		
G3	20	20		
G6	50	20		
G8	20	85		

### 2.2.2 2개 이상의 선로에 대한 ATC 증대

2-3개의 선로에서 비슷한 ATC값을 가지는 경우, 한 선로만 고려하게 되면 다른 비슷한 ATC값을 가졌던 선로에서의 ATC가 감소하여 전체 송전선로의 ATC를 감소시키는 경우가 있다. 이에 본 논문에서는 하나 이상의 선로에 관하여 선로의 ATC를 종합적으로 고려하여 전체 송전 선로의 ATC를 최대화 할 수 있는 방안을 함께 모색하였다. 아래 <그림 1>의 모선 9에서 모선 2로의 ATC를 구해 보면 6-9선로에서 157.01 MW, 1-2선로에서 157.57 MW의 거의 비슷한 ATC값을 가진다.

<그림 1> 두 선로에서 비슷한 ATC값을 가지는 경우의 10모선 예



이때 6-9선로만을 고려하여 발전량을 재분배하는 경우 각각의 발전기의 발전량과 이때의 송전선로의 ATC는 다음 <표 4>와 같다. 여기서 보여지듯이 6-9선로만을 고려하는 경우 6-9선로의 ATC는 증가 하지만 1-2선로의 ATC 감소로 전체 송전 선로의 ATC는 오히려 9.87% 감소하였다.

<표 4> 6-9선로만 고려한 경우

	발전력 재분배 전	발전력 재분배 후	변화량(%)
6-9선로의 ATC	157.01	253.50	61.45
1-2선로의 ATC	157.57	141.52	-10.19
송전선로의 ATC	157.01	141.52	-9.87
G6	34	150	
G7	34	33.6	
G8	63	5	
G9	34	34	
G10	62.6	5	

6-9선로와 1-2선로의 각각의 발전기에 대한 민감도와 발전기 용량 제한은 아래 <표 5>와 같다. 이때 6-9선로와 1-2선로를 모두 고려하여 전체 송전 선로의 ATC가 최대로 되는 발전력 재분배하면 전체 ATC가 17.48% 증가 한 것을 알 수 있다. 선로 조류와 ATC의 변화는 아래 <표 6>와 같다.

<표 5> 선로의 민감도와 발전기 용량 제약

	6-9 선로의 민감도	1-2 선로의 민감도	발전기 용량 제약
G6	0.417	0.082	$30 \leq P \leq 150$
G7	0.044	-0.204	$30 \leq P \leq 150$
G8	-0.008	-0.036	$30 \leq P \leq 150$
G9	-0.424	0.127	$30 \leq P \leq 150$
G10	-0.029	0.031	$30 \leq P \leq 150$

<표 5> 6-9선로와 1-2 선로 모두 고려한 경우

	발전력 재분배 전	발전력 재분배 후	변화량(%)
6-9선로 전력조류	16.3	5.3	-67.48
6-9선로 ATC	157.01	177.30	12.92
1-2선로 전력조류	13.1	5.1	-61.07
1-2선로 ATC	157.57	172.04	9.18
송전 선로의 ATC	157.01	172.04	9.57
G6	34	51.7	
G7	34	82	
G8	63	30	
G9	34	34	
G10	62.6	30	

### 3. 결 론

송전 선로의 ATC는 어느 특정 선로로 인하여 제약이 발생하며, 이 선로의 각각의 발전기의 발전량 변화에 대한 민감도를 구하고 이를 바탕으로 발전력을 재분배하여 선로의 전력 조류를 감소시킴으로서, 전체 송전 선로의 ATC를 10~20%정도 향상시킬 수 있었다. 물론 이런 경우 발전비용이 증가하게 된다. 발전비용의 증가는 계통의 경제적 운용에 상당한 차질을 가져오고, 경쟁 시장에서의 경쟁력을 약화시킨다. 따라서 발전 비용의 증분을 고려한, 비용대비 최적 발전량 재분배 알고리즘의 연구, 개발이 시급한 과제이다.

#### (참 고 문 헌)

- (1) NERC, "Available Transfer Capability Definitions and Determination", 1996
- (2) Gabriel C. Ejebe, "Fast Calculation of Linear Available Transfer Capability", IEEE Transactions on Power Systems VOL.15 NO.3. 2000
- (3) 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
- (4) 임규형, "혼잡처리의 해외 사례 분석을 통한 한국전력시장에서의 혼잡처리 방안 모색", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p385~387, 2000
- (5) 하동완, "Multi-segment curve method를 이용한 선형 계획법 기반 최적 조류계산", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p200~202, 1999.