

동적 송전 용량을 적용한 총 송전용량 및 가용송전용량 산정

김동민\*, 배인수\*, 김진오\*  
\*한양대학교 전기공학과

Calculation of TTC and ATC considering dynamic thermal limit

Dong-Min Kim\*, In-Su Bae\*, Jin-O Kim\*  
\*Dept. of EE, Hanyang University

**Abstract** 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC) 계산을 위해 우선 결정해야할 요소는 총 송전용량(Total Transfer Capability : TTC)이며 이는 일반적으로 열, 전압, 안정도 한계치에 의해 결정된다. 국내 계통의 송전선로 길이를 고려할 때, 이 세 가지 한계치 중 열 정격은 TTC 결정에 가장 큰 비중을 차지하는 요소이다. 따라서 본 논문은 열적 한계치에 동적 송전용량(Dynamic Line Rating : DLR)의 개념을 도입하여 TTC를 결정하는 새로운 접근법을 제안한다. 이 방법은 기존의 방법에 비해 주변 환경의 물리적 변화에 따른 정확한 계산 결과를 제공함으로써, 실제 사용가능한 용량을 평가한다. 마지막으로 제안하는 방법의 유용성을 보이기 위해 IEEE-24 모선 RTS를 이용하여, 기존의 방법과 제안하는 방법을 비교하였다.

전설비 신뢰도 기준을 만족시키기 위해 필요한 양, 그리고 ETC는 현재 사용용량을 나타낸다.

그림 1은 TTC를 결정을 위한 제한요소와, ATC를 계산의 개념을 표현한 것이다.

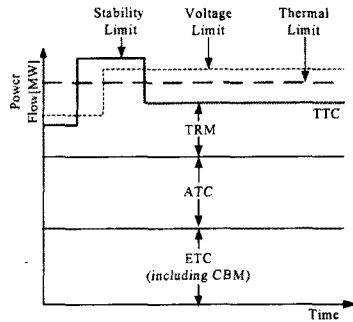


그림 1 TTC 및 ATC의 결정

1. 서 론

국내 전력산업은 수년 전부터 산업구조를 수직통합체제에서 경쟁체제로 전환하기 위한 구조개편을 진행해 왔고, 이에 따라 과거에 비해, 전력거래에 참여하는 전력회사들의 경제성과 효율성이 강조되고 있다. 따라서 발전회사 분리 이후, 차후 전력시장의 완전개방을 고려하여 개별 사업자의 최대 이익을 목적으로 하는 연구가 각 분야에서 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 송전선을 안정적으로 운용하면서 상업적 이용을 확대하기 위해, 기존에 사용하고 있는 용량에 추가적으로 사용할 수 있는 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)을 계산한다. 또한 기존의 단일 열적 한계치 적용의 비경제성을 극복하고자 이에 동적 송전용량을 적용하고 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 ATC의 정의

북미 신뢰도 위원회(North American Electric Reliability Council : NERC)의 정의에 따르면 가용송전용량(ATC)의 계산은 송전선을 안정적으로 운용하면서 상업적 이용을 확대하기 위하여, 기존에 사용하고 있는 용량에 추가적으로 사용할 수 있는 송전용량, 즉 송전계통에 주어진 시간동안 사용하지 않고 남아 있는 용량을 측정하는 것이다. ATC는 다음과 같이 계산 된다[1].

$$ATC = TTC - TRM - ETC(\text{including CBM}) \quad (1)$$

여기서, 총송전용량(TTC)은 한 지역에서 다른 지역으로 계통 안전도의 위반 없이 안전하게 송전할 수 있는 최대 송전량이며, 송전 신뢰도 여유도 (Transmission Reliability Margin : TRM)는 계통의 불확실성을 고려하여 전력계통의 안정적인 운전의 보장을 위해 필요한 양, 설비편익 여유도(Capacity Benefit Margin : CBM)는 발

2.2 TTC의 제한요소

신뢰성을 보장하며 한 지점에서 다른 지점으로 전송할 수 있는 최대 송전용량으로 정의하는 TTC는 계통의 물리적, 혹은 전기적 한계로 제약받게 된다. 일반적으로 송전용량은 그 도체가 허용할 수 있는 전류에 대한 열용량, 송전 선로의 송수전단 전압강하 한계 값 및 계통의 안정도 여유에 의해 제약을 받는다[2]. 따라서 TTC는 결정 시점의 열, 전압, 안정도 한계치의 최소값으로 결정한다.

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

예를 들어, 그림1의 경우 TTC는 시간에 따라 안정도, 전압, 열적, 안정도 한계의 순서로 제약되고 있음을 알 수 있다.

2.2.1 선로 길이와 송전용량 제한요소의 관계

154[kV]급 송전 선로의 경우, 일반적으로 약 80[km] 이하에서는 열용량의 대부분을 송전할 수 있지만 그 이상에서는 전압강하의 유지가 문제가 된다. 또한, 도체의 종류, 선로의 규격 및 송전 전압 등에 의해 차이가 있지만 약 320[km]이상의 경우 안정도 여유가 송전용량을 제한하는 중요한 요인이 된다[2].

본 논문에서는 국내 실 계통에 ATC의 개념 적용을 위해, 국내 계통을 수도권과 비수도권 지역으로 구분하여 부상조류를 담당하는 345[kV]급 이상 주요 송전선로 6개를 선정하였다. 수심 km 이하의 선로가 대부분인 국내 계통의 경우, 열적 한계치가 TTC 결정에 가장 큰 비중을 차지하는 요소임을 알 수 있다.

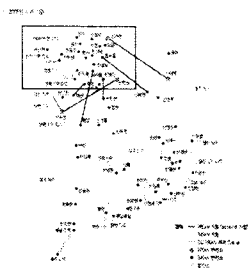
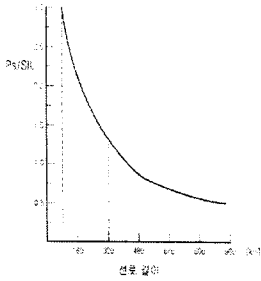


그림 2 선로길이와 loadability 그림 3 국내 계통의 지역구분

### 2.2.2 열적 한계치

열적 한계치는 다른 요소와는 달리 물리적 제약조건이다. 이는 주변 환경 즉 기상조건에 따라 변경하여 적용할 수 있으며, 이러한 동적 송전용량(Dynamic Line Rating : DLR)의 기법 및 적용사례는 이미 활발히 연구가 되었다.[3]. 그림 4는 일반적인 ATC계산 시 고려하는 단일 열 정격(Static Line Rating : SLR)과 주변의 기상조건을 고려한 동적 송전용량(DLR)을 아산 T/L의 각 계절 대표일을 계산하여 비교한 그래프이다.

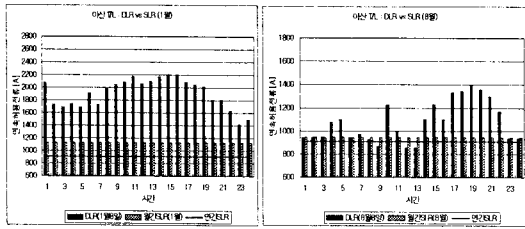


그림 4 DLR과 SLR의 비교 (아산 T/L; 1월, 8월)

겨울철 대표일의 경우, SLR에 비해 DLR은 거의 모든 시간대에서 월등히 높은 값을 보이고 있다. 따라서 송전 용량으로서 DLR을 사용하는 것이 전력 계통운영의 경제성 측면에서 바람직하다.

반면 여름철 대표일의 경우, 일부 시간대에는 현재 적용하고 있는 SLR보다 DLR이 높은 시간대가 존재한다. 따라서 실 계통에서도 실시간으로 변화하는 기상자료를 이용하여 매시간 변화하는 DLR을 적용하는 것은 전력 계통 운영의 경제성뿐만 아니라 안정성 면에서도 유용한 정확한 평가라 할 수 있다.

### 2.3. 연속조류계산법을 이용한 TTC 계산

현재 널리 사용되고 있는 TTC 계산 방법 중 연속조류계산법(Continuous Power Flow : CPF)방법은 최대주입전력량을 찾는 일반적인 방법으로, 정확한 계산을 장점으로 갖는다. 이는 전력을 주입하는 지역의 유효 전력량을 계통 안전도 위반을 발생시키지 않는 범위까지 증가시킴으로써 TTC를 구하는 방법이다[4]. 본 논문에서는 상이한 열적 제한요소에 따른 TTC 계산 결과를 비교하기 위해 CPF기법을 적용하여 TTC를 결정하였다.

CPF방법을 이용하여 TTC를 결정하는 방법의 수학적 표현은 다음과 같다.

Object :

$$P_{Li} = P_{Li0}(1 + \lambda K_{Pi}) \quad (3)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0}(1 + \lambda K_{Qi}) \quad (4)$$

여기서  $P_{Li0}$ ,  $Q_{Li0}$ 는 i 모선에서의 base case 주입전력량이고,  $K_{Pi}$ ,  $K_{Qi}$ 는 participation factor이다.

Constraints :

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij, \max} \quad (7)$$

여기서  $\lambda$ 는 모선 발전량 증가를 표현하는 파라미터로서  $\lambda=0$ 는 base case,  $\lambda=\lambda_{\max}$ 일 때 최대전력전송을 나타낸다. 또한,  $P_i$ ,  $Q_i$ 는 모선 i에서 유·무효전력, G는 발전기, L은 부하를 나타내며,  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  각 모선의 어드미턴스 행렬의 유·무효 부분을,  $S_{ij}$ 는 송전 선로 ij의 피상전력,  $S_{ij, \max}$ 는 송전선로 ij의 정격용량,  $\theta_{ij}$ 는 모선 ij의 위상각 차이를 나타낸다.

CPF방법을 이용하여 TTC를 계산하는 알고리즘은 다음과 같다.

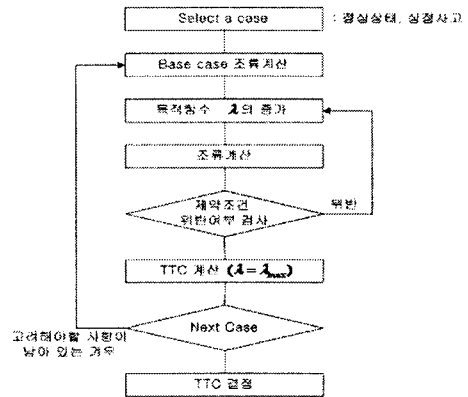


그림 5 CPF 방법을 이용하여 TTC를 계산하는 알고리즘

### 2.4 TRM

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 고려해야 한다.

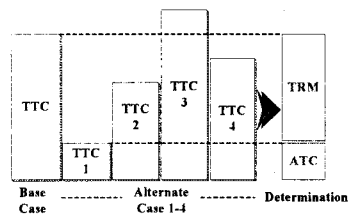


그림 6 TRM 결정

TRM을 결정하는 과정은 그림6과 같다. 우선 base case TTC와 고려되어야 할 모든 경우의 TTC를 계산한다. TTC는 가장 작은 값을 갖는 TTC로 결정되므로, base case TTC와 가장 작은 값을 갖는 TTC간의 차이를 TRM으로 결정한다.

### 2.5 CBM

CBM은 발전설비 신뢰도 기준을 만족시키기 위한 예비비이다. 각 지역은 일정 수준의 발전설비 신뢰도를 유지하여야 하며, 발전설비 신뢰도를 계산하는 방법에는 결정론적 방법과 확률론적 방법이 있다. 결정론적 방법은 가장 큰 발전기의 손실에 대비한 예비용량, 혹은 이

미 정해진 특정한 양의 예비용량을 유지해야만 한다. 확률론적 방법은 일반적으로 사용되는 신뢰도 지수인 Loss of Load Expectation(LOLE)등을 발전기 강제 고장, 유지보수 고장, 최소 정전시간, 부하예측 등의 입력 데이터를 이용하여 산정한다. 특히 발전 예비력에 대해 확률론적인 방법을 적용하면 LOLE가 특정 범위 (LOLE < 0.1day/year)를 만족해야 한다.

## 2.6 사례연구

본 절에서는 사례연구를 통해 열정격을 단일 정격 SLR로 적용한 경우와 동적 열정격 DLR로 적용한 경우의 ATC 계산 결과를 비교, 분석하여 제안하는 방법의 유용성을 확인한다.

### 2.6.1 모의 조건

국내 계통의 ATC 계산에 제안하는 접근 방법을 적용하기에 앞서 본 논문에서는 IEEE 24×2계통 Reliability Test System (RTS)을 이용하여 모의하였다[5].

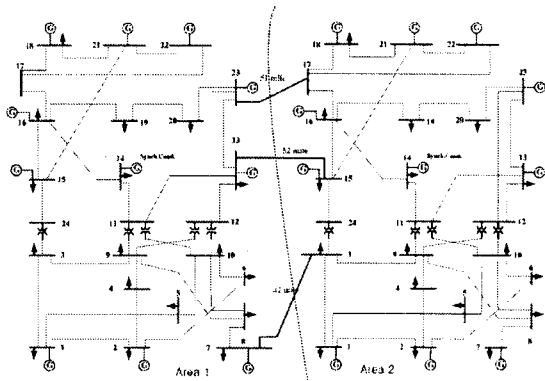


그림 8 연계계통 모델 - IEEE RTS 24x2 계통

또한, 제안한 방법의 효과를 확인하기 위하여, 선로별의 기상상황을 가정하여 Case 2에서는 표 1과 같이 열적 한계치를 변경하여 적용하였다. 2.2.2절에서 언급한 바와 같이, 실 계통의 DLR 계산 결과와 같은 효과를 적용하기 위하여 계절별 열 정격 증가분의 하중을 달리하였다. 두 가지 방법의 결과만을 단순 비교하기 위해, 계절별 부하량의 변화는 없다고 가정하였다.

표 1. Thermal Limit의 기준 변화

	Thermal Limit의 기준	
	Case 1 (기존 방법)	Case 2 (제안한 방법)
여름철	IEEE information	랜덤 증가(+0~10%)
겨울철	적용	랜덤 증가(+30~50%)

### 2.6.1 모의 결과 및 분석

표 2는 단일 열 정격을 적용한 Case 1의 ATC 계산 결과이며, 표 3은 Case 1과 동적 열정격을 적용한 Case 2의 ATC 계산 결과를 비교한 것이다.

표 3을 분석해 보면, 열용량을 상이하게 적용함에 따라, 상대적으로 큰 열용량 값을 보이는 겨울철에 더 큰 ATC를 확보할 수 있다. 또한 여름철로 가정할 경우 열용량이 +10%이하로 증가함에 따라 ATC 또한 그에 상응하는 증가량을 보이고 있는 반면, 겨울철의 경우 전기적 제한요소(전압, 안정도 한계)로 인해 물리적으로 확보할 수 있는 열용량 모두를 ATC로 환원하지 못하는 결과를 얻었다.

표 2. 기존 방법을 이용한 ATC 계산 결과 [MW]

	TTC	TRM	CBM	ATC
정상상태	274.45			
송전선로 정격용량 감소	266.53			
line 123-217 상정사고	270.25	16.73	50	207.72
line 113-215 상정사고	309.33			
line 107-203 상정사고	264.74			
지역1의 가장 큰 발전기고장	270.63			
지역2의 가장 큰 발전기고장	257.72			
부하의 불확실성 고려	268.71			

표 3. Thermal Limit의 기준에 따른 ATC

	ATC 계산 결과 [MW]		중분 [MW]	
	Case 1 (기존 방법)	Case 2 (제안한 방법)		
여름철	207.72	+5%	212.21	4.49
		+7%	220.46	12.74
		+10%	224.48	16.76
		+30%	234.44	26.72
겨울철	207.72	+40%	236.45	28.73
		+50%	236.45	28.73

따라서 제안하는 방법은 전기적 제한요소의 한계치 내에서, ATC의 평가 결과를 증가시킴으로써 선로 운영자에게 경제성 측면에서 유용한 정보가 될 수 있음을 확인하였다.

## 3. 결 론

국내 계통의 송전선로 길이를 고려할 때, 열적 한계치는 TTC 결정의 주요 제한 조건이 되며, 다른 전기적 제한 요소와는 달리 물리적 환경을 고려하여 선 평가가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 단일 열적 한계치 적용의 비경제성을 극복하고자 동적 송전용량을 적용하여 ATC 산정하는 방법을 제안한다. 기존 산정 방법과의 비교 분석을 위해 국내 계통의 지역을 구분하고 계절별 실시간 열용량을 산정하여 그 추이를 분석하였다.

사례연구에서는 IEEE RTS 24 × 2 계통을 이용하여, 열적 한계치를 제외한 다른 요소들은 모두 동일하다고 가정함으로써 제안하는 방법의 유효성을 분석하였다.

향후 연구로서 국내 실계통의 ATC를 제안한 방법으로 계산한다면, 실시간 부하 및 발전량 변화뿐만 아니라 실시간 동적 열정격을 고려한, 보다 정확한 ATC 계산 결과를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] North American Electric Reliability Council (NERC), "Available Transfer Capability -Definitions and Determination s", NERC Report, June 1996.
- [2] R. Gutman, "Applications of loadability concepts to operating studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1426-1433, 1988.
- [3] 김동민, 배인수, 김진오, 조종만, "송전선로의 이용률 평가 및 합리적 운영에 관한 연구", 전기학회논문지 제55A권 제1호, 2006.
- [4] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang, W. F. Tinney, "Available Transfer Capability Calculations", IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No. 4, Nov.1998.
- [5] The IEEE Reliability Test System-1996, "A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 1010-1020, 1996.