

확률론적 조류계산을 이용한 송전 신뢰도 여유 계산

신동준* 김진오* 김규호**
*한양대학교 전기공학과 **안산 공과대학

Calculate Transmission Reliability Margin using Probabilistic Load Flow

Dong-Joon Shin* Jin-O Kim* Kyu-Ho Kim**
*Dept. of EE, Hanyang Univ. **Ansan College of Technology

Abstract - As a definition of NERC, Available Transfer Capability(ATC) is a measure of the transfer capability remaining in the physical transmission network for the future commercial activity.

To calculate ATC, accurate and defensible TTC, CBM and TRM should be calculated in advance. In this paper, we propose a method to quantify TRM using probabilistic load flow based on the method of moment. Generation output, bus voltages, loads, and line outages are considered as complex random variables (CRV) to take into account for uncertainties related to the transmission network conditions. Probability Density Function (PDF) of line flow at the most limiting line is used to quantify TRM with the desired probabilistic margin.

Suggested method is compared with the results from conventional CPF method and verified using 24 bus MRTS, and the suggested method based on PLF shows efficiency and flexibility for the quantification of TRM compared with the conventional method.

1. 서 론

성공적인 전력시장의 운영을 위해서는 정확하고 빠른 계통의 가용 송전 용량 계산이 요구된다. 양방향 시장에서 ATC는 송전 권리(Transmission Right) 분배를 위한 예비 용량으로 사용되며 풀 시장에서는 입찰 정보와 함께 송전 혼잡 해결을 위해 사용된다.

북미 신뢰도 협의회(NERC : North American Electric Reliability Council)의 정의에 의하면, ATC 계산시 고려하여야 할 요소에는 최대 전송 용량(TTC : Total Transfer Capability), 송전 신뢰도 여유(TRM : Transmission Reliability Margin), 그리고 용량 이득 여유(CBM : Capacity Benefit Margin) 등이 있다. 이중 TRM은 계통 상황의 불확실성과 계산 오차를 고려하기 위한 여유용량으로, 예측하지 못한 발전기 탈락, 선로 고장, 선로 임피던스 변화, 그리고 부하 변동 등의 상황이 발생하여도 계통의 안정적인 운영을 보장하기 위해 ATC 계산시 고려해 주어야 한다.

지금까지 TRM을 계산하기 위해 여러 가지 방향으로 연구가 진행되어 왔다. 이들 기법중 대부분은 CPF(Continuous Power Flow)나 PTFD(Power Transfer Distribution Factor)와 같이 결정론적인 방법을 기초로 하고 있다. 하지만 이러한 기존의 결정론적인 TRM 결정 기법은 단지 송전망의 특정 상태를 단적으로 보여줄 뿐이며, 가능한 모든 선로 및 발전기 탈락 등의 상전사고를 고려하기에는 적합하지 않다. 따라서 기존의 결정론적인 TRM 계산 기법은 계통 운영자가 약천후나 부하 예측 오차와 같은 불확실성을 고려하여

TRM을 조정할 수 있는 여지가 거의 없다고 할 수 있다. 이러한 기존의 결정론적 TRM 계산 기법의 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 TRM 계산시 확률론적인 접근을 위하여 모멘트를 이용한 확률론적 조류계산(PLF : Probabilistic Load Flow) 기법을 적용한 TRM 계산 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 발전기 고장, 모선 전압, 부하 변동, 선로 탈락 등의 계통 불확실성을 고려하여 TRM을 계산할 수 있으며, 계통 운영자가 원하는 수준의 확률적인 여유를 가진 TRM을 선로 전송 용량을 제한하는 요소의 확률 밀도 함수를 이용하여 계산할 수 있다.

사례연구에는 IEEE 24 모선 MRTS(Modified Reliability Test System)를 이용하여 제안한 PLF를 이용한 TRM 계산 기법을 적용하였으며, 기존의 결정론적인 TRM 계산 기법인 CPF 기법과 결과를 비교하였다. 이를 통하여 본 논문에서 제안한 PLF를 이용한 TRM 계산 기법을 적용할 경우 계통의 불확실성을 고려한 결과를 얻을 수 있으며 이를 통해 계통 운영자가 계통 운영상의 재량을 발휘할 수 있음을 보였다.

2. 본 론

2.1 ATC 및 TRM

NERC의 정의에 따르면 ATC는 두 계통간의 연계 선로를 통해 증가시킬 수 있는 송전 용량으로 정의되며, ATC 계산시 TTC, CBM, 그리고 TRM 등의 계산이 요구된다.

TTC는 열, 전압, 조류 제한등의 어떠한 계통 안정도 위반을 일으키지 않는 지역간 최대 전송 용량을 의미하며, TRM은 송전 계통 조건, 상정사고, 그리고 매개변수와 관련한 불확실성에 대비하는 여유 용량이다. 따라서 TRM은 상호 연계된 계통이 일정한 수준의 불확실성에도 안전하게 유지될 수 있는 정도의 여유용량으로 결정하여야 한다. 그리고 CBM은 LSE(Load Serving Entities)가 연계된 계통의 예비력을 이용할 수 있도록 보장하는 여유 용량으로 정의된다. 따라서 ATC는 다음 식(1)로 표현된다.

$$ATC = TTC - TRM - ETC - CBM \quad (1)$$

2.2 확률론적 조류 계산

일반적인 결정론적 조류계산은 특정 상태에 있는 계통의 정적 시뮬레이션이라고 할 수 있다. 이때 입력되는 정보는 부하 모선의 유, 생효전력 수요와 발전기 버스의 유효전력 출력 및 전압 크기이며, 기존의 결정론적 조류 계산 기법은 입력 정보에 따라 하나의 결과만을 얻을 수 있으며 만일 부하, 발전기 출력이나 선로의 고장으로 인한 계통 상태에 변화가 생긴다면 변화된 계통 상태에 따른 정보를 입력하여 조류계산을 다시 수행하여야 한다. 계통의 운영자의 입장에서는 일정 범위의 부하나 발전기 출력 변화에 따라 모선의 전압이나 선로의 조류 변화를 평가할 수 있기 위하여 이를 위해 확률론적 조류계산 기

법이 도입되었다. 확률론적 조류계산은 확률변수를 이용하여 조류계산을 수행하며 결과적으로 부하 모선의 전압, 선로 조류등의 변화 범위를 해당하는 확률값과 함께 결과로 출력하게 된다.

2.3 TRM 계산을 위한 PLF 기법 적용

본 논문에서는 조류 계산을 위한 변수는 복소 확률변수를 이용하였으며 조류 계산은 모멘트 도메인에서 수행되었다. 모멘트를 이용하여 확률 변수의 상승적분(Convolution)을 계산하였으며 Gram-Charlier expansion을 이용하여 모멘트를 PDF로 변환하였다.

모멘트를 이용한 PLF 계산을 첫 번째 단계는 모선별로 각 부하와 발전기의 수요 및 출력의 PDF의 상승적분을 계산하여 각 모선의 총 입력 전력을 구하는 것이다.

각 모선의 총 입력 전력을 구한 후 전압 계산을 위하여 Y-bus 요소의 모멘트를 계산한다. 각 모선 전압의 모멘트는 반복법을 이용해 계산하며 (n+1) 번째 전압의 모멘트는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$m_r(V_{k(n+1)}^r) = (1/m_r Y_{kk}^{(r)}) m_r[S_k^* / (V_{k(n)}^{(r)})^* - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{ki}^{(r)} V_{i(n+1)}^{(r)} - \sum_{i=k+1}^n Y_{ki}^{(r)} V_{i(n)}^{(r)}] \quad (2)$$

이때 Y_{ki} : 모선 k 와 i 사이의 어드미턴스

$V_{k(n)}$: n 번째 반복시 모선 k 의 전압

전압 계산을 위한 반복은 모선 전압의 크기변화가 일정 값 이하로 수렴할 때까지 반복된다. 전압 계산후 선로 전류와 전력의 모멘트를 전류 방정식을 이용 계산한다. 마지막으로 Gram-Charlier expansion을 이용하여 각 결과치의 모멘트를 PDF로 변환한다. 확률변수 X의 PDF $f(x)$ 를 정규분포 확률변수 Z와 이 변수의 PDF $N(z)$ 를 이용하여 표현하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f(z) = N(z) - G_1 N^{(3)}(z)/6 + G_2 N^{(4)}(z)/24 + G_1 N^{(6)}(z)/72 + \dots \quad (3)$$

이때 $z = (x - \mu) / \sigma$

$$N(z) = 1 / \sqrt{2\pi} e^{-z^2/2}$$

$$N^{(i)}(z) = d^i N(z) / d^i z$$

$$G_1 = k_3(X) / [k_2(X)]^{3/2}$$

$$G_2 = k_4(X) / [k_2(X)]^2$$

식 (3)의 Gram-Charlier expansion을 이용하여 선로 조류를 제약하는 요소의 전압이나 전류의 PDF를 계산할 수 있으며 이 PDF를 이용하여 TRM을 계산한다.

2.4 PDF를 이용한 TRM 계산

PLF를 이용한 TRM 계산 기법의 첫 단계는 기존의 CPF를 이용하여 전력 전송 용량을 제약하는 요소(The Most Limiting Element)를 찾는 것이다. CPF의 결과로 base case TTC를 결정할 수 있으며 이때 제약 요소도 결정된다. base case TTC를 통해 제약 요소에 최대 부하가 걸리는 상태를 파악할 수 있으며 이 상태를 입력 자료로 이용하여 PLF 계산을 수행하게 된다. 만일 계통의 한 선로가 제약 요소일 경우 PLF 분석을 통하여 이 선로의 PDF를 얻을 수 있으며 이 PDF를 이용하여 제약 선로의 용량을 원하는 확률적 여유용량

(PM : Probabilistic Margin)을 가지는 용량으로 제한할 수 있다. 그림 1에 PDF를 이용한 새로운 선로 한계 용량 결정 개념을 나타내었으며 이때 새로운 한계 용량은 식 (4)를 이용하여 계산 할 수 있다.

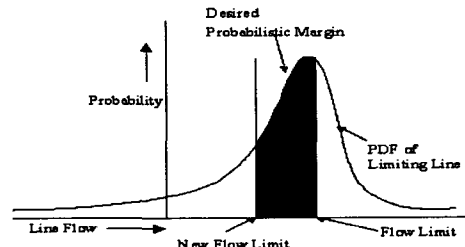


그림 1. PDF를 이용한 새로운 한계 용량 계산

$$PM = \frac{\text{FlowLimit}}{\text{NewFlowLimit}} \int \text{PDF}(\text{Lineflow}) \quad (4)$$

그림 1에서 볼 수 있듯이, 확률론적 여유 용량은 계통의 상태 변화에 대처하기 위한 여유 용량이며 제약 요소의 PDF 형태에 따라 같은 확률론적 여유 용량에도 다른 제약값을 보인다. 제약 선로의 새로운 선로 한계 용량을 계산한 후, 새로운 한계 용량을 적용하여 CPF로 TTC를 계산하게 되며 이때 base case TTC와 새로운 TTC와의 차가 TRM으로 결정된다. 그림 2에 제안한 PLF를 이용한 TRM 계산의 순서도를 나타내었다.

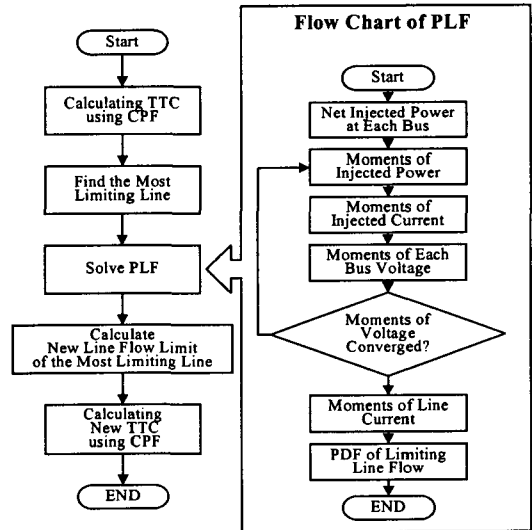


그림 2. PLF를 이용한 TRM 계산 순서도

3. 사례 연구

IEEE MRTS 24 모선 계통을 이용하여 제안한 PLF를 이용한 TRM 계산 기법을 적용하였다. 모델 계통은 그림 3에 나타내었으며 5개의 연계선로로 연계된 두 개의 지역으로 구분하였다. 연계선로는 선로 11-13, 11-14, 12-13, 12-23, 그리고 15-24 선로이며, 선로 조류 제약은 174MW이다.

제안한 PLF를 이용한 TRM 계산 기법과 비교하기 위하여 기존의 결정론적인 CPF를 이용하여 TRM을 계산하였다. CPF를 이용한 TRM 및 ATC 계산 결과는 표

1에 나타내었으며 선로의 정격 및 전압 한계를 일정수준(3%) 줄여 계산한 경우가 가장 작은 TTC를 보였으며 정의에 따라 Base case TTC와 정격 감소를 적용한 TTC와의 차이인 31.91MW가 TRM으로 결정되었다.

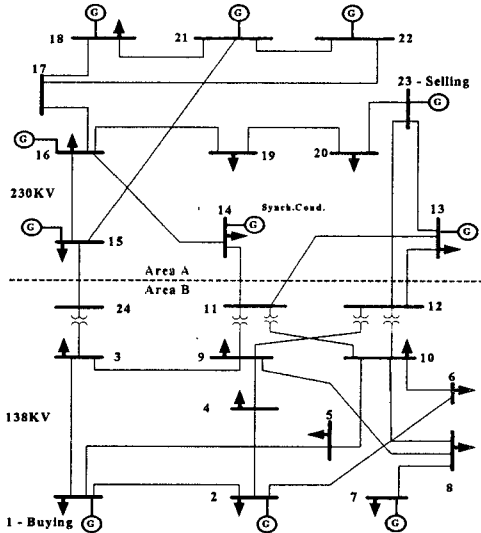


그림 3. IEEE MRTS 24모선 계통도

표 1. CPF를 이용한 TRM 계산 결과

Case	TTC [MW]	TRM [MW]	ATC [MW]
Base Case	244.33	31.91	212.42
Reactance : +10%	235.05		
Reactance: -10%	236.52		
Rating reduction	212.42		
Line 11-13 outage	312.33		
Line 11-14 outage	285.43		
Line 12-13 outage	293.01		
Line 12-23 outage	303.75		
Line 15-24 outage	229.93		

3.1 PLF를 이용한 TRM 계산

CPF를 이용하여 Base case TTC를 제한한 결과 선로 14-16의 용량계약으로 TTC가 제약되었으며 이때의 결과를 이용하여 PLF를 수행하였다. PLF 결과 14-16 선로의 선로 조류 PDF를 구할 수 있었으며 이를 그림 4에 나타내었다. 이 PDF를 이용하여 원하는 확률론적 여유를 가지는 새로운 한계 용량을 계산하였으며 이때 확률론적 여유는 10, 20, 30%의 세 값을 계산하였다.

그림 5은 그림 4의 PDF의 한계용량 부위를 확대한 그림이다. 그림에서 실선은 선로의 조류 PDF를 나타내고 있으며 점선은 선로 한계 용량인 174MW로부터 PDF를 적분한 값을 나타내고 있다. 이 적분값이 원하는 확률론적 여유인 10, 20, 30%에 도달한 위치가 새로운 선로 용량 제한치가 되며 각각 166, 157, 그리고 146MW로 제한치가 변경됨을 알 수 있다.

이렇게 제약 요소인 14-16선로의 용량 제한을 변경하여 새롭게 TTC를 계산하였으며 결과를 표 2에 정리하였다. 제안한 PLF를 이용한 TRM 계산 기법은 원하는 확률론적 여유 수치를 따라 각기 다른 TRM 값을 보임을 알 수 있다. 이는 한정된 횟수의 상정사고만을 고려할 수 있는 기존의 결정론적인 계산 기법과 다른 장점으로 계통의 날씨나 시장 상황에 따라 계통 운영자의 재량으로 확률론적 여유를 변경하여 TRM을 결정할 수 있음을 보여주는 것이다.

표 2. PLF를 이용한 TRM 계산 결과

확률적 여유	10%	20%	30%
TTC(ATC) [MW]	235.02	227.76	220.9
TRM [MW]	9.31	16.57	23.43

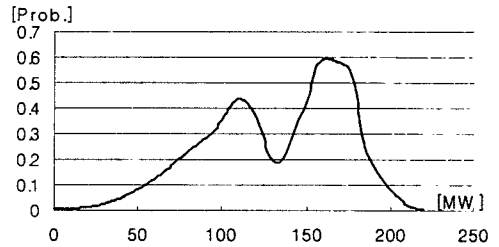


그림 4. 선로 14-16에 흐르는 조류의 PDF

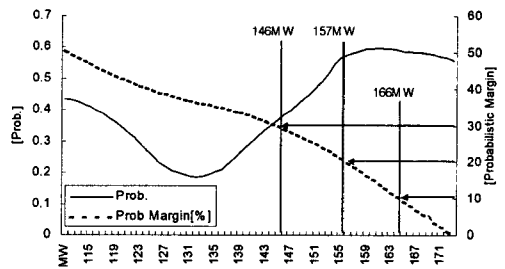


그림 5. PDF를 이용한 한계용량 계산

4. 결 론

본 논문에서는 PLF를 이용한 TRM 계산 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 기존의 결정론적인 TRM 계산 기법과 달리 계통의 발전기 출력 변화, 선로의 사고 등을 확률변수로 모델링 하여 계통의 상태 변화에 따른 선로 조류 및 모선 전압 변화를 PDF로 나타낼 수 있었으며 이를 이용하여 전송 용량을 제약하는 요소의 PDF를 적분하여 원하는 확률적 여유를 가지는 TRM을 계산할 수 있었다.

사례연구에서는 IEEE MRTS 24모선 계통을 이용하여 기존의 CPF를 이용한 TRM 계산 결과와 비교하였으며 이를 통하여 제안한 PLF를 이용한 TRM 계산 기법이 계통 운영자가 원하는 확률론적인 여유에 따라 TRM을 계산할 수 있는 유연성이 있음을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] NERC. "Available Transfer Capability Definition and Determination". 1996
- [2] B. Borkowskoo. "Probabilistic Load Flow". *IEEE Transaction*. Vol. Pas-93. pp 725-759. 1974
- [3] R. N. Allan. Probabilistic Techniques in AC Load flow Analysis. *IEE Proceeding*. Vol. 124. pp 154-160. 1977
- [4] S. Patra, R.B. Misra. "Probabilistic Load flow Solution using Method of Moments". *IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong*, pp922-934. 1993