

확률론적 기법을 이용한 시변 ATC 용량 결정

신동준*, 이준경*, 이호상*, 김진오*, 정현수**
 *한양대학교 전기공학과 **삼원전력

Probabilistic approach to time varying Available Transfer Capability calculation

Dong-Joon Shin, Jun-Kyung Lee, Hyo-Sang Lee, Jin-O Kim, Hyun-Soo Chung
 Dept. of EE, Hanyang Univ., SamWon Electric Co.

Abstract - According to NERC definition, 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.

This paper proposes a method to quantify time varying ATC based on probabilistic approach. The uncertainties of power system and market are considered as complex random variables. TRM with the desired probabilistic margin is calculated based on PLF analysis, and CBM is evaluated using LOLE of the system.

Suggested ATC quantification method is verified using IEEE RTS with 72 bus. The proposed method shows efficiency and flexibility for the quantification of ATC.

1. 서 론

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

북미 신뢰도 협의회(NERC : North American Electric Reliability Council)의 정의에 의하면, ATC 계산시 고려하여야 할 요소에는 최대송전용량(TTC : Total Transfer Capability), 송전신뢰도여유(TRM : Transmission Reliability Margin), 그리고 용량이익여유(CBM : Capacity Benefit Margin)가 있다. TRM과 CBM은 계통의 불확실성 및 공급부족에 대비한 여유용량이며 계산시 반드시 불확실성 및 사고에 대한 고려가 요구된다. 하지만 기존의 결정론적인 ATC 계산 기법은 계통 및 시장의 불확실성을 고려하는데 효과적이지 못하였으며 ATC 예측 기간에 따른 변화를 반영하지 못한다는 단점을 보였다.

본 연구는 전력시장의 운영 체계를 고려한 확률론적 기법을 이용한 ATC 계산 기법을 제안하였다. 확률론적 기법을 이용한 ATC 계산 방식은 계통 및 시장의 불확실성이 큰 계획 단계에 적용하기 적합하며, 확률론적 조류계산 및 Monte Carlo 기법을 함께 이용한 계산기법을 제시하였다. 계통 및 시장의 불확실성은 ATC 예측 기간에 따라 달라지는 시변적 특성을 보이며 예측 기간이 길어질수록 불확실성은 증가하게 된다. 계통의 상정 사고 등을 고려하여 계통 구성요소에 가해지는 조류 및 전압의 변화 범위를 분석할 수 있는 확률론적 조류계산을 이용하여 TRM을 계산하는 기법을 제안하였다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 계통의 LOLE를 계산하여 CBM을 계산 할 수 있음을 보였다.

2. 본 론

2.1 ATC 와 TRM, CBM

ATC는 두 계통간의 연계 선로를 통해 증가시킬 수 있는 송전 용량으로 정의되며, ATC 계산시 TTC, CBM, 그리고 TRM의 계산이 요구된다.

TTC는 어떠한 계통 안정도 위반도 일으키지 않는 지역 간 최대 전송 용량을 의미하며, TRM은 송전 계통 조건, 상정사고, 그리고 매개변수와 관련한 불확실성에 대비하는 여유 용량이다. 그리고 CBM은 LSE(Load Serving Entities)가 연계된 계통의 예비력을 이용할 수 있도록 보장하는 여유 용량으로 정의된다. 따라서 ATC는 다음 식(1)로 표현된다.

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

이때 ETC는 기존 송전선로 이용용량이다.

2.2 확률론적 조류계산

일반적인 결정론적 조류계산은 특정 상태에 있는 계통의 정적 시뮬레이션이라고 할 수 있다. 기존의 결정론적 조류계산 기법은 입력 정보에 따라 하나의 결과만을 얻을 수 있으며 만일 계통 상태에 변화가 생긴다면 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(PLF : Probabilistic Load Flow) 기법이 도입되었다. 확률론적 조류계산은 확률변수를 이용하여 조류계산을 수행하며 결과적으로 부하 모선의 전압, 선로 조류 등의 변화 범위를 해당하는 확률값과 함께 결과로 출력하게 된다.

2.2.1 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 PDF(Probability Density Function)로 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.

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

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 변환하며 이 PDF를 이용하여 TRM을 계산한다.

2.2.2 PDF를 이용한 TRM 계산

PLF를 이용한 TRM 계산 기법의 첫 단계는 기존의 CPF(Continuous Power Flow)를 이용하여 전력 전송 용량을 제약하는 요소(The Most Limiting Element)를 찾는 것이다. CPF의 결과 base case TTC를 결정할 수 있으며 이때 제약요소도 결정된다. base case TTC를 통해 제약요소에 최대 부하가 걸리는 상태를 파악할 수 있으며 이 상태를 입력 자료로 이용하여 PLF 계산을 수행한다. PLF 분석을 통하여 그림 1과 같은 제약요소의 PDF $f(z)$ 를 얻을 수 있다.

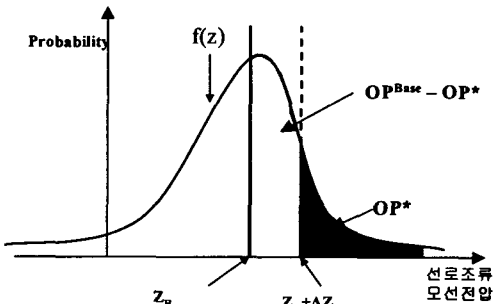


그림 1. 제약요소의 PDF 및 정격조정

이때 제약요소의 정격을 Z_R 에서 ΔZ 만큼 증가시킨다면 이때 사고확률은 base case TTC의 사고확률 OP^{Base} 에서 OP^* 로 감소하며 이때 얻을 수 있는 계통의 상정사고에 대한 확률적 여유 PM(Probabilistic Margin)은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$PM = \frac{OP^*}{OP^{Base}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

제약요소 정격의 물리적 증가로 얻을 수 있는 PM은 TTC를 줄여 제약요소의 부담을 같은 양만큼 감소시킴으로써도 얻을 수 있으며 이때 PM은 계통운영자의 의도대로 결정할 수 있다.

2.3 Monte Carlo Simulation을 이용한 CBM 계산

본 논문에서는 CBM 계산을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였다. 본 논문에서는 계통의 LOLE를 평가하기 위하여 발전기의 2 state 모델을 적용하였으며 부하의 불확실성은 고려하지 않았다. 발전기의 random sampling을 기반으로 총 발전량을 평가하였으며 발전기 상태의 지속시간 또한 고려하지 않았다. 이는 전력거래가 이루어지는 시점의 발전상태를 평가하여야 하기 때문이며 전력거래는 일반적으로 1시간에서 30분 단위로 이루어져 고장으로 탈락한 발전기의 수리 여부는 고려하지 않아도 되기 때문이다.

각 지역의 LOLE를 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 계산한 후 미리 설정된 기준치와 LOLE값을 비교하여 기준에 미치지 못하는 지역이 있는지 판별한다. 만일 LOLE 기준에 미치지 못하는 지역이 존재할 경우 발전량을 증가시킨 후 LOLE를 계산하며 이를 LOLE 기준을 만족시킬때까지 반복한다.

이때 증가된 발전량이 LOLE 기준을 만족시키지 못하는 지역이 연계 지역으로부터 받아야 하는 예비력 용량이며 이 용량이 이 지역의 CBM으로 결정된다.

3. 사례연구

연계계통간의 ATC 결정을 모의하기 위한 모델로 3개의 IEEE RTS 24모선 계통을 상호 연계한 24x3 모선 계통을 이용하였다. 연계 계통 모델을 그림 2에 나타내었으며 모델은 지역 10, 20, 30의 3개 지역으로 구분되어 총 5개의 연계선로로 연계되어 있다. 전체 계통은 총 72개의 모선과 96기의 발전기, 그리고 119개의 선로로 이루어져 있다.

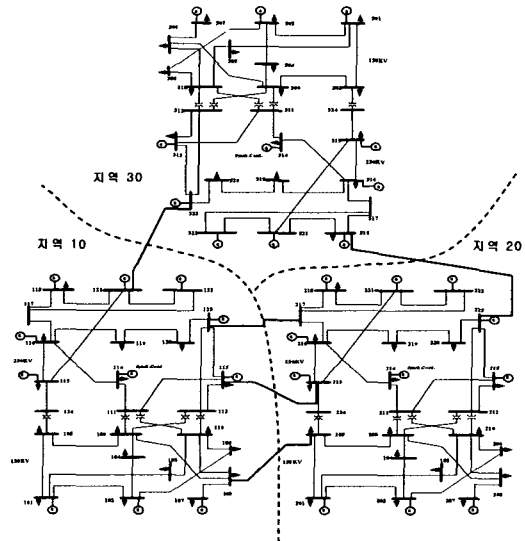


그림 2. 연계계통 모델 - IEEE RTS 24모선X3 계통

3.1 TRM 계산

TRM을 계산하기위한 확률론적 조류계산은 Base case 총송전용량이 결정된 순간의 계통상태, 즉 지역 30에서 지역10으로 1203.31MW의 송전이 이루어지며, 121-323 선로에 최대 부하가 걸리는 시점의 데이터를 이용하여 계산하였다.

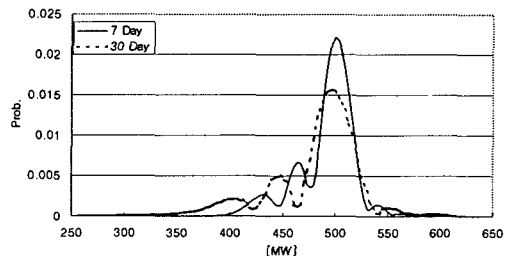


그림 3. 121-324 선로 조류의 확률분포함수

확률론적 조류계산의 결과 얻어진 121-324번 선로 조류의 확률분포함수를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 실선은 7일 후의 조류 확률분포함수이며 점선은 30일 후의 조류 확률분포함수이다.

그림 3의 확률분포함수를 이용하여 선로 정격 조절에 따른 TRM 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 실선은 7일 후의 ATC의 확률적 여유이며 점선은 30일 후의 확률적 여유를 보이고 있다. 선로 용량 정격을 기준인 500MW에서 줄어갈수록 상정사고시 변화하는 선로 조류에 대한 여유 마진이 증가하여 PM이 증가함을 볼 수 있다. 또한 30일 후의 조류 확률분포함수가 더 큰 분산을 보이기 때문에 같은 확률적 여유를 확보하기 위해서는 선로 정격을 더 줄여야 함을 알 수 있다.

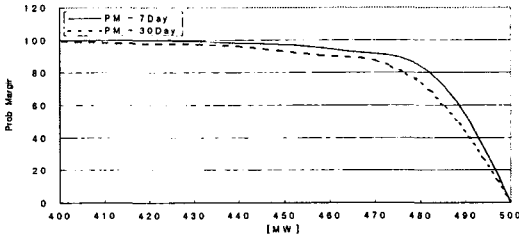


그림 4. 선로 정격 조절에 따른 PM 변화

그림 4를 보면 7일 후의 ATC의 경우 선로 정격을 491MW로 9MW만 줄여도 50%의 상정사고에 대한 여유용량이 확보됨을 알 수 있다. 또한 선로 정격을 461MW로 조절할 경우 7일 및 30일 후의 ATC 모두 90%이상의 상정사고에 대비할 수 있다.

그림 4의 데이터를 이용하여 TRM을 계산하였다. 계통 운영자가 원하는 확률적 여유를 각각 50, 70, 90%로 설정하여 TRM을 계산하였으며 결과를 표 1에 정리하였다. 7일 후의 TRM과 30일 후의 TRM을 각각 구분하여 정리하였으며, 결과를 분석하여보면 같은 확률적 여유를 확보하기 위해서는 30일 후의 송전신뢰도 여유용량을 더 크게 설정하여야 함을 알 수 있다. 이는 예측 기간이 길수록 불확실성이 증가하기 때문이며 이러한 불확실성에 대비하기 위하여 더 큰 여유용량이 요구되기 때문이다.

표 1. PM에 따른 TRM 변화

PM [%]	7일 후 Case		
	선로정격[MW]	TTC [MW]	TRM [MW]
50	491	1181.21	22.1
70	484	1160.80	42.51
90	473	1126.33	76.98
PM [%]	30일 후 Case		
	선로정격[MW]	TTC [MW]	TRM [MW]
50	488	1174.25	29.06
70	482	1152.99	50.32
90	461	1102.45	100.86

3.2 CBM 계산

본 논문에서는 계통의 신뢰도 지수중 하나인 LOLE를 이용하여 LOLE가 0.5day/year 이하가 되도록 CBM을 계산하였다. 표 2에 LOLE 계산 결과 및 지역간 예비력 교환 후 LOLE 계산결과를 정리하였다. LOLE 계산 결과 지역 10의 LOLE가 기준을 초과하였기 때문에 가장 LOLE가 낮은 지역 30에서 지역 10으로 250MW의 예비력을 공급한 후 LOLE를 다시 계산하였다.

표 2. 지역별 LOLE 계산 결과

	지역 10	지역 20	지역 30
초기 LOLE	19.753	10.339	5.363
예비력 거래량	250MW	0	-250MW
예비력 거래후 LOLE	11.355	10.339	9.757

LOLE를 재계산한 결과 세 지역 모두 LOLE가 설정치보다 낮아졌기 때문에 설비편의 여유용량은 지역 30에서 지역 10으로 250MW의 예비력을 송전할 수 있는 용량으로 결정되었다.

3.2 ATC 계산

TRM과 CBM 계산 결과를 이용하여 ATC를 계산하였다. 표 3에 정리된 결과에서 알 수 있듯이 ATC 용량은 예측 기간과 PM에 따라 931.21MW에서 852.45MW까지 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과에서 ATC 계산시 본 논문에서 제안한 확률론적 접근법을 적용할 경우 예측 기간에 따른 불확실성의 증가를 고려할 수 있으며 동시에 계통운영자가 계통 및 시장상태를 판단하여 적절한 수준의 PM을 선택할 수 있음을 알 수 있다.

표 3. 예측 기간에 따른 ATC 계산 결과

TTC [MW]		1203.31		
CBM [MW]		250		
PM		50%	70%	90%
TRM [MW]	7일	22.1	42.51	76.98
	30일	29.06	50.32	100.86
7일 후 ATC [MW]		931.21	910.8	876.33
30일 후 ATC [MW]		924.25	902.99	852.45

3. 결 론

본 논문에서는 확률론적 기법을 이용한 ATC 계산 기법을 제시하였다. PLF를 이용하여 원하는 PM을 갖는 TRM을 계산할 수 있는 기법을 보였으며 계통의 LOLE를 이용하여 CBM을 계산할 수 있음을 보였다. IEEE RTS 72모선을 사용한 사례연구를 통하여 제안한 확률론적 접근법을 이용할 경우 예측 기간에 따른 불확실성 변화를 ATC 계산에 고려할 수 있음을 보였다. 또한 계통운영자가 계통 상태 및 시장 현황을 반영하는 PM을 선택하여 TRM 용량을 조절할 수 있음을 보였다.

감사의 글
이 논문은 2002년도 한국과학재단의 지원으로 수행되었음 (F01-2003-000-00073-0)

[참 고 문 헌]

- NERC. "Available Transfer Capability Definition and Determination". 1996
- B. Borkowskoo. "Probabilistic Load Flow". *IEEE Transaction*. Vol. Pas-93. pp 725-759. 1974
- R. N. Allan. Probabilistic Techniques in AC Load flow Analysis. *IEE Proceeding*. Vol. 124. pp 154-160. 1977
- 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