

불확실한 날씨 상태를 고려한 총 송전용량 계산

박진욱*, 김규호**, 신동준***, 김진오*
 *한양대학교 전기공학과 **안산공과대 ***한국전기연구원

Calculation of Total Transfer Capability Considering Uncertainty of Weather

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

Abstract - This paper proposes a method to evaluate the TTC by considering uncertainty of weather. Impact of the contingency on the system performance could not be addressed in a deterministic way because of the random nature of the system equipment outage and the increase of outage probability according to weather condition. For this reasons, probabilistic approach is necessary to realize evaluation of TTC. This method uses a sequential MCS. In sequential simulation, the chronological behavior of the system is simulated by sampling sequence of the system operating states based on the probability distribution of the component state duration. Therefore, MCS is used to accomplish the probabilistic calculation of TTC with consideration of weather condition.

1. 서 론

현재 송전망 운영은 과거의 신뢰도 위주의 운영방식에서 벗어나 신뢰도 한계 내에서 최고의 효율적 운영을 추구하는 방식으로 변화하게 되었다. 송전용량이란 개념은 이러한 환경에서 송전망과 전력거래의 효율성을 높이기 위해 사용하기 시작한 개념으로 계통의 한 지점에서 다른 지점으로 전송할 수 있는 최대 전력을 의미하며, 총 송전용량(Total Transfer Capability)란 시스템의 명시된 제약조건과 신뢰도의 위반 없이 상호 연계된 송전 네트워크로 송전할 수 있는 전력의 가장 큰 값을 의미한다. TTC는 가용송전용량(ATC)를 계산하기 위한 중요한 요소이다. TTC와 ATC의 관계는 NERC의 정의로부터 가용송전용량(ATC)은 총 송전용량(TTC)에서 송전신뢰도 여유도(TRM)와 설비편의 여유용량(CBM) 및 기존 송전용량(ETC)의 합을 뺀 용량이다 [1]. TTC를 계산하기 위한 방법으로 본 논문에서는 RPF(Repeated Power Flow)방법을 이용하여 두 가지 단계를 걸쳐 TTC를 계산하였다. 첫 번째 단계에서는 전압한계와 열적한계를 고려하여 TTC를 결정하였다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구한 TTC값이 시스템의 과도 안정도한계를 위반하지 않을 때 적절한 TTC값이 결정되었다. 하지만, 전력 시스템 운영은 날씨 상태에 따라서 불확실한 사고의 발생과 송전선로의 고장율의 증가 때문에 결정론적인 방법으로 설명하기에는 어려움이 있다. 이러한 이유에서, 불확실한 날씨 상태를 고려한 확률적 접근 방법이 현실적인 총 송전용량을 평가하기 위해 필요하다. 확률적인 접근 방법은 순차적인 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하였다. 순차적인 시뮬레이션은 난수를 사용하여 각 구성요소의 상태기간을 나타내는 확률변수의 확률분포를 구하고, 이에 따른 각 사건을 시간이 경과하는 순서대로 발생시키는 방법이다. 이 때 순차적인 시뮬레이션을 이용하여 불확실한 날씨효과를 고려한 총 송전용량을 평가할 수 있다.

2. 총 송전용량의 결정

2.1 2 단계 기법의 RPF

총 송전용량을 결정하기 위해 2 단계 계산 기법을 적용한 RPF 방법을 이용하였다. RPF 방법은 sink 지역의 부하 모선과 source 지역의 발전기 모선에서 부하와 발전량을 증가시켜 제약조건이 위반되지 않을 때 까지 전력을 송전함으로써 총 송전용량을 결정할 수 있다 [2]. RPF 방법을 이용한 총 송전용량의 수학적 표현은 다음과 같다. 송전용량을 계산하기 위해 λ 항으로 나타내면

목적함수 : Maximize λ

$$P_{Gi} = P_{G0} (1 + \lambda k_{Gi}) \tag{1}$$

$$P_{Li} = P_{L0} (1 + \lambda k_{Li}) \tag{2}$$

$$Q_{Li} = Q_{L0} (1 + \lambda k_{Li}) \tag{3}$$

여기서,

- λ : 부하모선과 발전모선에서 전력량 증가를 표현하는 파라미터
- P_{G0} : i 모선에서의 초기 유효전력
- P_{L0}, Q_{L0} : i 모선에서의 초기 유·무효전력
- k_{Gi}, k_{Li} : participation factor

이때 제약조건은

$$P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \tag{4}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \tag{5}$$

$$|V_i|_{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|_{\max} \tag{6}$$

$$|S_{ij}| \leq |S_{ij}|_{\max} \tag{7}$$

$$|\delta_{Gi}(t) - \delta_{Gj}(t)| \leq \delta_{G\max} \tag{8}$$

여기서,

- P_{Gi}, Q_{Gi} : 모선 i 에서 발전기 유·무효전력
- P_{Li}, Q_{Li} : 모선 i 에서 부하 유·무효전력
- $|V_i|$: 모선 i 에서 전압크기
- $|V_i|_{\min}$: 모선 i 에서의 최소 전압크기
- $|V_i|_{\max}$: 모선 i 에서의 최대 전압크기
- $|S_{ij}|_{\max}$: 선로 ij 에서 정격용량
- $\delta_{G\max}$: 최대 swing angle

그림 1은 2 단계 계산 기법을 적용한 RPF 방법으로 TTC를 결정하는 알고리즘을 나타내었다.

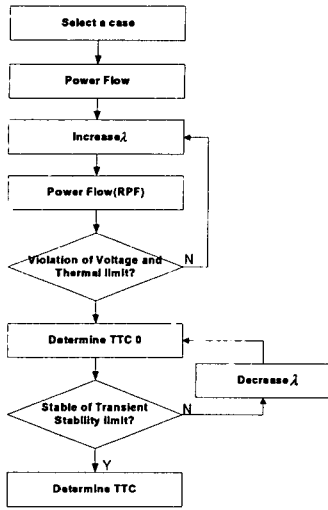


그림 1 RPF 방법을 이용한 TTC 결정 알고리즘

RPF 방법에서 과도 안정도를 모든 과정에 고려하는 것은 시간이 너무 많이 소요되는 단점이 있다. 그래서 TTC를 결정하기 위해 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 초기 조류 계산에서 계산된 송전용량을 바탕으로, 전압한계와 열적한계를 위반하지 않을 때 까지 λ 를 증가하여 TTC를 결정한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 결정된 TTC값을 바탕으로 이 시스템에서 상정사고가 발생한 경우 과도안정도 한계의 위반여부를 판별한다. 만약 시스템이 과도 안정도를 위반한다면 과도 안정도 한계를 만족 할 때 까지 λ 를 감소하여 이 시스템에서의 TTC 값으로 결정할 수 있다 [4].

2.2 확률론적인 방법

2.2.1 불확실한 날씨 상태를 고려한 날씨 상태 모델

전력 시스템은 매우 다양한 날씨 상태에 노출 되어져 있다. 일반적으로, 송전선로는 기상 조건에 영향을 받는 2가지 상태로 정의 할 수 있다. 기상조건은 정상기상조건(normal weather)과 가혹기상조건(adverse weather)로 분류된다. 송전선로에 대한 상태 천이도(state transition diagram)는 그림 2와 같다 [5].

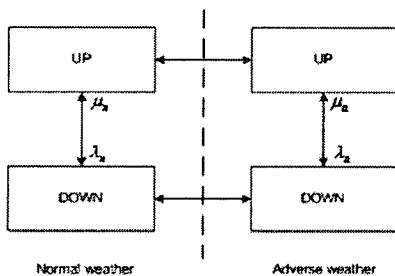


그림 2 불확실한 날씨 상태를 고려한 시스템 구성요소의 상태 천이도

여기서,

λ_n = 정상 기상 조건하에서의 고장율
 μ_n = 정상 기상 조건하에서의 수리율

λ_a = 가혹 기상 조건하에서의 고장율

μ_a = 가혹 기상 조건하에서의 수리율

2.2.1 MSC를 이용한 확률론적인 방법

본 논문에서는 상태 추출 방법인 순차적인 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하였다. 순차 모의 범은 난수를 사용하여 각 구성요소의 상태시간을 나타내는 확률변수의 확률 분포를 구하고 이에 따른 각 사건을 시간이 경과하는 순서대로 발생시키는 방법이다.

본 논문에서는 2-State 모델을 적용하여, 송전 계통의 구성요소를 UP 상태와 DOWN 상태 두 단계로 구분 하였다. UP 상태에서 운영 시간은 TTF(time to failure)라 하고, DOWN 상태에서의 수리 시간을 TTR(time to repair)라 한다. TTF와 TTR은 지수 분포를 가진다고 가정 하였다 [3].

$$TTF_i = -\frac{1}{\lambda_i} \ln(1 - U) \quad (9)$$

$$TTR_i = -\frac{1}{\mu_i} \ln(1 - U) \quad (10)$$

여기서

λ_i : 구성요소 i 의 고장율

μ_i : 구성요소 i 의 수리율

U : random number

시스템의 운영 상태는 그림 3과 같이 시스템의 모든 구성요소의 상태와 불확실한 날씨 상태를 고려하여 결정 할 수 있다.

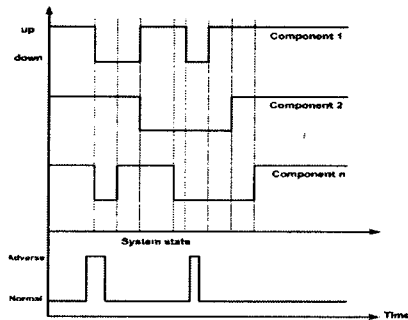


그림 3 순차적인 MCS를 이용한 시스템 구성요소의 상태

3. 사례 연구

WSCC-9 모선 시스템을 본 논문의 TTC 계산에 이용 하였다. 시스템을 세 개의 지역으로 나누었고 각 모선에서의 전압한계는 $0.95 \leq V \leq 1.05$ 로서 모든 모선에 동일하게 적용하였다. 그림 4에서는 9 모선 시스템과 송전 선로의 정격 용량을 나타내었다.

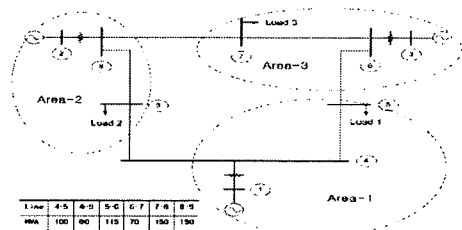


그림 4 WSCC-9 모선 시스템

지역 2를 source지역, 지역 3을 sink지역으로 가정하였다. RPF 방법을 이용한 첫 번째 단계에서 전압과 열적한계를 고려하여 송전용량을 결정한다. 만약 송전선로에서 사고나 외란이 발생하였을 경우, 두 번째 단계인 과도안정도 한계를 위반하는가를 수행한다. 이때 시스템의 안정도 위반한다면 위반 하지 않을 때까지 λ 를 감소하여 송전용량을 결정한다. 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 RPF에 의한 연계선로 7-8의 송전용량 계산 결과

case	TTC level (MW)
base case	148.14
선로 4-5 고장	148.14
선로 4-9 고장	148.14
선로 5-6 고장	136.79
선로 6-7 고장	145.62
선로 8-9 고장	100.22

불확실한 날씨 상태를 고려한 확률적인 접근 방법을 적용하기 위해, 날씨 상태는 실제 서울 관측소 기상 정보를 이용하여 정상 날씨 상태와 가혹 날씨 상태를 구분하였다 [7]. 정상 날씨에서의 고장율과 수리율은 임의로 가정하였고, 가혹 날씨에서의 고장율은 정상 날씨에서보다 수십 배 크다고 가정하였다. 순차적인 MCS를 이용하여, 시스템의 운영 상태는 그림 5와 같은 결과를 도출하였다. 여기서 세로축은 시스템 구성요소의 생존을 가로축은 8760시간에 대한 시스템의 운영 상태를 나타낸다.

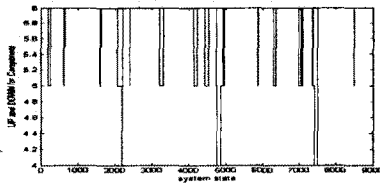


그림 5 날씨 상태를 고려하지 않은 시스템의 운영상태

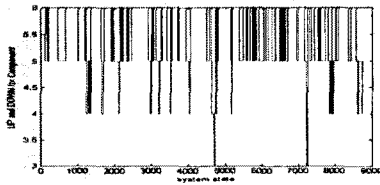


그림 6 날씨 상태를 고려한 시스템의 운영상태

순차적인 MCS는 그림 6과 같이 총 송전용량의 PDF(probability distribution function)를 제공한다.

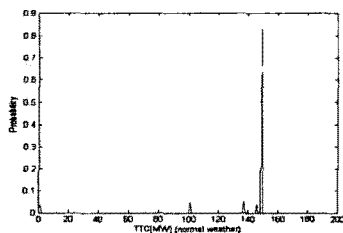


그림 7 날씨 효과를 고려하지 않은 총 송전용량의 PDF

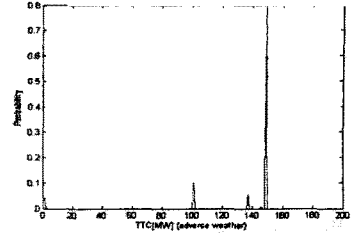


그림 8 날씨 효과를 고려한 총 송전용량의 PDF

정상 날씨 상태에서 대부분의 시스템 사고는 145 MW에서 150 MW의 범위에서 발생한다. 이것은 시스템의 TTC를 150 MW 정도로 결정할 수 있다는 것을 의미이다. 반면에 날씨 상태를 고려했을 경우, 시스템 전체의 생존 확률은 낮아진다. 따라서 시스템이 날씨 상태를 고려하여 운영되어야 할 경우, 날씨 상태를 고려하지 않았을 경우와 비교해 보면 지역 2에서 지역 3으로의 송전용량은 100 MW까지 떨어질 확률이 높아지며 시스템을 안정적으로 운영하기 위해서는 100 MW 정도를 이 시스템의 TTC로 결정하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 논문에서는 가용 송전용량을 결정하기 위해 중요한 구성요소인 총 송전용량 결정하였다. 기존의 총 송전용량 결정에 있어서 고려하기 어려웠던 과도안정도 제약을 2단계 계산 기법을 적용하여 과도 안정도를 보다 용이하게 고려할 수 있음을 보였다. 또한 총 송전용량 계산에서 시스템 신뢰도의 영향을 미치는 불확실한 날씨 상태를 고려하였다. 날씨 상태와 확률적인 접근 방법을 고려한 결과, 가혹 날씨 상태에서 총 송전용량이 정상 날씨 상태에서 보다 낮다는 것을 증명할 수 있었다. 시스템 운영자가 경제적이고 효율적인 운영을 위해 이것을 바탕으로 적절하게 시스템 운영에 적용할 수 있을 것이다.

향후 연구로는 결정된 총 송전용량을 바탕으로 송전 신뢰 여유도와 설비 편의 여유도를 결정하여 가용 송전용량에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초 전력연구원 주관으로 수행된 과제(R-2004-B-221)임.

[참 고 문 헌]

- [1] Transmission Transfer Capability Task Force, "Available Transfer Capability Definitions and Determination", NERC, Princeton, June 1996.
- [2] Y. Ou, C. Shing, "Assessment of Available Transfer Capability and Margins", Power Systems, IEEE Transactions, Vol. 17, Issue 2, May 2002, pp. 463-468.
- [3] K. Auorn, A. Yokoyama, "Consideration of an Appropriate TTC by Probabilistic Approach", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 19, 2004, pp. 375-383.
- [4] P. A Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability". IEEE press, 1994.
- [5] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power system", Plenum Press, New York, 1996.
- [6] 김기호, 박진욱, 김진오, 신동준, "전압제약을 고려한 가용 송전용량 결정 및 분석" 대한전기학회 전력기술부문회 추계 학술대회, 2004, pp. 169-171.
- [7] 신봉식, 김진오, 차승태, 전봉훈, 추진부, "송전선로 고장실적과 날씨와의 통계적 상관관계 분석" 대한전기학회 추계 학술대회, 2004, pp.391-393.