

TPLAN 프로그램을 적용한 전력계통 정상상태 상정사고 해석 고찰

김동준 김호용 김태욱 심정운
한국전기연구원 한국전력공사

A Review of Steady State Contingency Analysis of Power System Using TPLAN Program

D.J. Kim H.Y. Kim T.O. Kim J.H. Shim
KERI KEPCO

Abstract - This paper describes the contingency analysis methods which are used in the transmission reliability program, TPLAN. Reliability criterion, reliability assessment, ranking methods, and screening methods are discussed. In addition, a simple 25-bus system was tested with TPLAN and its analyses are presented in this paper.

1. 서 론

송전선로 신뢰도는 발전단으로부터 부하단까지 송전설비의 운전 한계 범위내에서 전력이 전송되는 것뿐만 아니라, 발생할 수 있는 모든 상정사고 또는 송전 중단없이 송전할 수 있는가를 관심으로 하고 있다. 따라서, 전력계통이 단지 정상적으로 운전된다는 것만으로 충분하지 않다. 전력계통은 외란에 대해서 대처할 수 있는 충분한 능력을 반드시 유지하여야 한다.

가장 많이 사용되고 있는 송전선로 신뢰도 제공 방법은 n-1 기준이다. 이것은 상정사고 해석 방법 중 하나로, 만약 계통이 계획되지 않은 어떠한 단일 사고에 대해서도 수용할 수 있으면서 운전할 수 있다면, 시스템은 충분히 믿을 수 있다고 말할 수 있다. 이러한 신뢰도 방법을 결정론적인 방법이라 한다. 이러한 결정론적인 신뢰도 평가 개념은 상정사고 해석과 밀접하게 관련이 있다. 경우에 따라서 상정사고 해석은 단일사고 n-1 해석뿐만 아니라, n-2의 2차 다중 상정사고, 사고 후의 상세 복구 조치(correction action or remedial action), 전압붕괴조건 파악, 경제급전, 부하 차단 등등을 수행할 수 있어야 한다.

국내의 신뢰도 상정사고 해석은 최대 3만5천 모선의 복미 계통에 비해서 1,000모선 정도의 아주 작은 계통이기 때문에 아직까지 수작업에 의하고 있으나, 전력시장의 도입과 날로 성장하는 전력수요와 이에 따른 계통의 복잡성에 의해서 전력계통을 자동적으로 계통 신뢰도를 판단할 수 있는 조류계산 상정사고 신뢰도 프로그램이 필요하다. 본 논문은 상용 신뢰도 프로그램인 TPLAN을 대상으로 이 프로그램에서 사용하고 있는 상정사고 해석 방법을 검토하고, 간단한 계통에 TPLAN을 적용해서 그 결과를 고찰한다.

2. 본 론

2.1 상정사고 신뢰도 평가 프로그램 TPLAN

일반 PC에서 TPLAN은 GUI 환경 또는 도스 Text 모드에서 실행된다. 이 프로그램은 정상상태의 조류계산을 해석을 기본으로 하며, 이 프로그램의 신뢰도 평가는 결정론적 평가 방법과 확률개념이 포함된 확률적 신뢰도 평가방법 두 가지로 구성되어 있다. 가장 많이 사용되는 방법은 결정론적 방법이기 때문에 본 논문에서는 결정론적 방법에 대해서만 제한한다. 그리고, TPLAN은 기본 모듈과 사용자 요구에 따라 추가되는 Add-on 모듈로 구성되어 있다.

2.1.1 TPLAN 기본 모듈 해석

기본 모듈로 해석할 수 있는 범위는 아래와 같다.

- 가. 결정론적 상정사고 해석 (Contingency Analysis): 조류계산을 통해서 상정사고를 해석 할 수 있다. 자동적으로 상정사고를 수행하는 방법과 특징하게 설정해서 할 수 있다. 계통분리, 부하차단, 전압붕괴점, 경제급전, 상정사고 후 제어조치, 다중 상정사고 등을 수행할 수 있다.
- 나. 확률적 신뢰도 평가(Probabilistic Reliability Assessment): 사고의 빈도(frequency)와 발생기간(duration) 등을 고려해서 확률적으로 신뢰도 지수를 제공한다. 상정사고 해석에 비해서 데이터가 많이 필요하다. 그러나, 데이터가 없는 경우는 generic 모델을 이용해서 해석할 수 있다.
- 다. 사고후 복구 조치(Corrective Actions): 발전력 재급전, 부하차단, 과부하와 저전압을 해결하기 위해서 phase-shift 제어 등등을 수행할 수 있다. 사고후 제어조치를 결정하기 위해서 최적화 기법을 사용한다.
- 라. 파라미터적 해석: 어떤 전력변수 변화에 대해서 다른 조류계산 변수 변화량을 결정하는 해석으로, V-Q해석과 P-V해석 등을 수행할 수 있다. 출력은 X-Y 그림으로 얻는 것이 가능하다.

2.1.2 Add-on 모듈

TPLAN 프로그램의 가능성을 향상하기 위해서 별도의 모듈을 사용자 요구에 따라 추가할 수 있다.

- 가. Interactive Expansion Planning: 기본 케이스와 선정된 상정사고의 과부하를 완하시켜 준다.
- 나. 최대전송한계 해석(Transfer Limit Analysis): 단일 상정사고와 다중 상정사고하 때의 과부하 상태에서 최대전송한계 해석을 수행한다. 열한계, 전압제약, 그리고 전압붕괴점에 기인한 상정사고를 AC 전력한계 해석을 수행한다.
- 다. 안전도 제약 경제 급전(Security Constrained Economic Dispatch): 현물가격, 상정사고 영향, 동시적인 전송한계 계산, 발전비용 해석등을 수행한다.

2.2 결정론적 상정사고 평가방법

조류계산을 이용한 상정사고 해석은 계통의 신뢰도 성능을 평가할 수 있는 사고의 조합을 선택하고 평가하는 작업이다. 기본 상정사고 분석 절차는 그림 1과 같다.

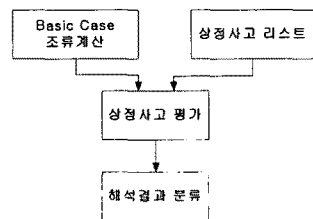


그림 1 기본 상정사고 분석 절차

2.2.1 신뢰도 판별 기준

상정사고 분석의 목적은 신뢰도 판별 기준에 대해서 성능을 검토하는 것이다. 상정사고 해석에서 적용 가능한 신뢰도 판별 기준은 아래와 같은 것이 있다.

- 송전선로 및 변압기 열용량
- 인터페이스 선로의 전력전송 용량한계
- 저전압/고전압 한계
- 전압붕괴점, 부하 차단
- 상정사고 확대, 복합 지수

검토하고자 신뢰도 판별 기준에 따라서 상정사고 해석 방법이 달라진다. 전압붕괴점이 주요 문제라면, 조류계산은 전압붕괴점에서 발산하지 않는 해석방법을 사용하는 중요한 것이며, 효과적인 부하차단이 중요하다면 최적화 기법이 필요할 것이다. 열용량이 중요한 문제라면 선형화된 DC 조류계산 방법으로도 충분할 것이다.

2.2.2 신뢰도 평가 방법

상정사고 평가라는 것은 상정사고에 대해서 계통의 응답을 모의하는 절차이다. 정상상태에서 상정사고 평가는 근본적으로 두 가지 방법이 있다.

- AC 조류계산
- 선형화된 DC 조류계산: 유효전력만 고려

TPLAN에서 AC 조류계산은 그림 2의 Non-Divergent 알고리즘[1]이 결합되어 전압붕괴점에서도 발산하지 않고 붕괴점에 근사적으로 접근할 수 있다. 그러나 이 전압붕괴점을 판단하는데 이 알고리즘은 약간의 문제점을 제기할 수 있다. 이 방법은 스텝크기를 조정해서 수렴시키는 문헌 [2]을 변형한 것이다. 문제점으로는 운전조건이 붕괴점이라 하더라도 배정도(double precision)를 사용하지 않으면, 일반적인 조류계산 판별조건에 들어오지 않을 수 있는 것이 있다는 것이다. 따라서, 근사적으로 해에 접근시킬 수 있으나 여전히 붕괴점을 찾지는 못할 가능성이 있다.

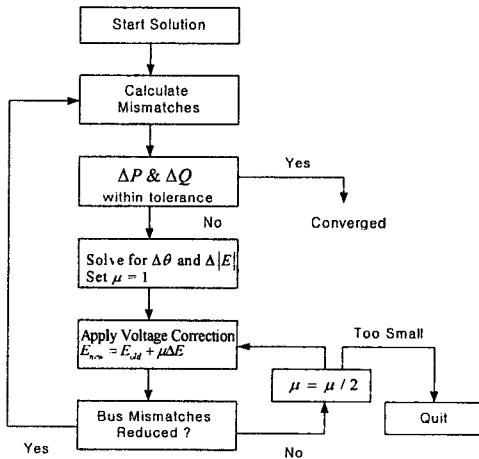


그림 2 Non-Divergent Newton 알고리즘

선형화된 DC 조류계산은 각 모선의 전압을 1.0p.u.로 고정하고 단지 유효전력만 계산하는 방법이다. 이 방법은 계산속도가 매우 빠르고, 송전선로와 인터페이스 선로의 전송한계를 간단하면서도 실용적으로 정확하게 계산할 수 있는 장점이 있다. 최소 만 모선이 넘는 북미 전력회사에는 이 방법을 매우 유용하게 사용하고 있다. 그러나 국내는 모선이 적고 송전선로의 열용량이 충분하므로 이 방법에 대한 필요성은 적을 것으로 판단된다.

TPLAN에서는 해석하고자 하는 지역만 부 계통으로 지정해서 감시, 상정사고, 경제급전, 그리고 사고 후 복구 조치 등을 취할 수 있다.

2.2.3 상정사고 리스트

상정사고 리스트는 사고를 평가하는 순서를 제공한다. 일반적인 상정사고 리스트를 그룹으로 나누면 표 1과 같다. 그룹 A 사고는 사용자가 지정한 사고로써 반드시 검토되어야 하는 사고가 된다. 그룹 B,C,D, 그리고 E는 순서가 결정된 상정사고이다.

표 1 상정사고 리스트에 따른 그룹

그룹	내용
A	특별히 지정된 사고
B	선로의 열용량에 미치는 정도에 따라 순서가 결정된 단일 발전기 사고
C	계통분리를 야기하는 선로사고
D	선로의 열용량에 미치는 정도에 따라 순서가 결정된 단일 선로사고
E	전압붕괴에 미치는 정도에 따라 순서가 결정된 단일 선로사고

사고 리스트와 그룹에 대해서 주지해야 할 사항은 다음과 같다:

- 각 그룹은 가장 가혹한 사고부터 순서가 내부적으로 순서가 정해진다.
- 사고는 그룹 순서대로 평가된다.
- 만약 사고가 앞 그룹에서 평가되었다면, 반복하지 않는다.

순서가 결정된 상정사고는 순서대로 하나 하나 검토되다가, 연속적으로 설정된 N 개의 사고가 계통에 문제를 유발하지 않으면 계산을 중단한다. 다음 절은 상정사고를 가혹도에 따라 순서를 정하는 랭킹절차에 대해서 기술한다.

2.3 상정사고 랭킹 및 스크리닝 방법

랭킹 절차는 사고정도에 따라 발생 가능한 상정사고에 순서를 정하는 과정이다. 계통에 큰 영향을 미치는 사고는 가장 높은 순위로 정해져야 한다. 랭킹 절차는 조류계산 해를 포함하지 않고, 단지 알고리즘적으로 성능지수를 추정한다. 반면, 스크리닝은 조류계산해물 어느 수준까지 포함한다. 예로, 선형화된 DC 조류계산 또는 가우스자이델 조류계산은 AC 조류계산 상정사고 해석에 대해서 스크리닝으로 사용될 수 있다.

상정사고는 다음 세 가지를 TPLAN에서 모의가능하며, 다중 사고는 이 사고의 조합으로 이루어진다.

- 1) 발전기 탈락사고
- 2) 선로 사고
- 3) 부하 사고

이론적으로 랭킹은 가혹도에 따라서 상정사고의 순서를 정하는 것이 가장 좋다. 랭킹 방법은 여러 가지가 있으나 TPLAN에서 사용하고 있는 방법은 아래 결과 같다.

2.3.1 과부하 랭킹

과부하 랭킹방법은 문헌 [3]에 기술된 방법이다. 이 랭킹 방법은 식 (1)의 성능지수에 따라 계산된 선로의 과부하 정도에 따라 상정사고에 순서를 정한 것이다.

$$PI = \sum_{j=1}^L W_j \left(\frac{P_j}{P_{MAXj}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, W_j = 상수가중계수 (선로 j)

P_j = 유효전력 (선로 j)

P_{MAXj} = 선로 j의 정격

L = 총 선로 갯수

경부하에서는 PI 지수는 상대적은 작은 값이지만, 중부하에서는 상대적으로 큰 값을 갖는다.

2.3.2 전압붕괴점 상정사고 랭킹

전압강하의 가혹정도는 전력계통의 무효전력 부족과 연관이 있다. 전압붕괴 성능지수는 상정사고 결과에 따른 무효전력의 손실 변화를 측정한다. 이것은 아래와 같이 정의된다:

$$PI = \sum_{i=1}^l X_i P_i^2 \quad (2)$$

여기서, X_i = 선로 I의 리액턴스
 P_i = 선로 I의 유효전력량

2.3.3 전압 상정사고 랭킹

전압 상정사고 랭킹은 전압붕괴 성능지수를 약간 변형한 것이다. 이것은 송전선로의 무효전력 손실뿐만 아니라, 모선 끝단에서 가용할 수 있는 무효전력 전원까지 고려한 것이다. 이것은 아래와 같이 정의 된다:

$$PI = \sum_{i=1}^l X_i \left(\frac{1}{P_{oj}^2} - \frac{1}{P_{ok}^2} \right)^{1/4} P_i^2 \quad (3)$$

여기서, X_i = 선로 I의 리액턴스
 P_i^2 = I선로의 전력량 제곱
 j, k = I 선로의 모선 "from" and "to"
 P_{oj}^2, P_{ok}^2 : 선로충전용량, 무효전력 전원과 부하 (모선 j and k)

2.3.4 다중 사고 (Multiple Contingency Levels)

단일 상정사고 n-1 해석은 앞에서 언급한 것처럼 그룹에 의해서 순서대로 일일이 검토한다. 검토 중에 연속적으로 N회 계통에 문제가 없으면 해석을 중지한다. 반면 다중 상정사고 중 n-2 상정사고인 경우를 해석하면 다음과 같은 순서로 계산된다.

- 단계 1: 신규로 순서가 정해진 사고 리스트를 단일사고 해석 후의 계통조건에서 작성한다.
- 단계 2: 계통에 문제를 발생하지 않은(non-failure) 초기 일차 상정사고(first level contingency) case를 실행한다. 다음으로, 다수의 2차 상정사고(second level contingency) 케이스를 연속 2번 문제가 발생하지 않은 케이스가 나올 때 까지 실행한다.
- 단계 3: 일차 상정사고를 단계 2처럼 실행한다.
- 단계 4: 두 개의 일차 상정사고 케이스에 대해서, 제일 먼저 수행되는 두 개의 이차 상정사고가 문제가 없으면 중단한다.

기타 다른 n-3같은 다중 사고에 대해서도 위의 절차를 반복한다.

2.4 계통적용

TPLAN 프로그램을 그림 3과 같은 6기 25모선 계통[4]에 적용하였다. 상정사고는 선로사고로서, n-1 단일사고와 n-2의 2차 상정사고를 가정하여 해석하였다.

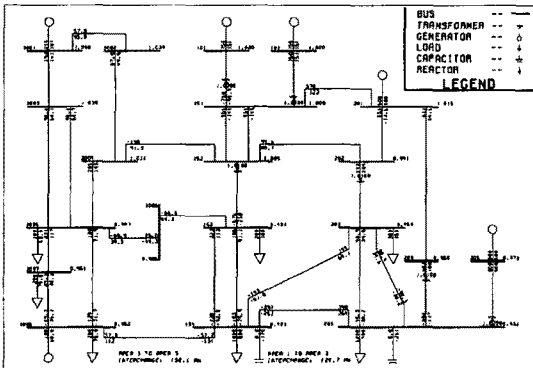


그림 3 6기 25모선 시스템

2.4.1 n-1 상정사고 신뢰도 해석 (선로사고)

표 2는 n-1 선로사고를 해석한 요약결과를 보여준다. 상세한 계산결과와 별도의 지정된 파일에 저장할 수 있다. 가장 가혹한 사고는 수렴되지 않은 사고로서, 총 28개의 상정사고에서 2가지 상정사고가 여기에 해당된다. 모선 204와 모선 205를 제거하는 경우 해가 없고, 모선 152와 모선 153의 선로를 제거해도 조류계산 수렴조건을 만족하는 해가 없다. 수렴된 상정사고는 19개 있으나 전압제약(10개)과 과부하 조건(19개)에 만족하지 못한다. 이 중 전압제약과 과부하 조건에 가장 열악한 사고는 모선 154와 모선 205를 연결하는 선로에 사고가 발생한 경우이다.

전압붕괴 상정사고는 Non-divergence 알고리즘을 적용한 경우이다. 문제점은 그림 3처럼 전력편차의 수렴조건에 만족하지 못하다라도 μ 가 아주 작은 경우 계산을 중지하고 전압붕괴점으로 간주한다는 것이다. 예로, 모선 201과 모선 204를 연결하는 선로에 사고가 난 경우, TPLAN 해석결과는 전압붕괴상정사고로 출력이 되었지만, 최대 전력편차는 30.83MW를 보여준다. 다시 말해, 수렴해가 없을 수 있는 사고도 전압붕괴 사고로 간주할 수 있는 가능성이 있다는 것이다.

표 2. n-1 상정사고 해석결과

실명	상정사고 개수
수렴된 상정사고	19
전압붕괴 상정사고	7
수렴되지 않은 상정사고	2
총 상정사고 개수	28

2.4.2 n-2 상정사고 신뢰도 해석 (선로사고)

n-2 선로사고 결과는 표 3과 같이 랭킹과 스크리닝을 통해 총 379상정사고에 대해서만 TPLAN이 자동적으로 계산해준다. n-2 상정사고는 전력회사에서 그다지 중요성이 낮기 때문에 자세한 설명은 생략한다.

표 3 n-2 상정사고 해석 결과

실명	상정사고 개수
수렴된 상정사고	143
전압붕괴 상정사고	186
수렴되지 않은 상정사고	50
총 상정사고 개수	379

3. 결 론

본 논문은 상용 신뢰도 프로그램인 TPLAN을 대상으로 이 프로그램에서 사용하고 있는 상정사고 해석 방법을 검토하고, 6기 25모선 계통에 적용하여 그 결과를 고찰하였다. 향후, 국내 전력계통의 성장성과 전력시장의 도입을 고려할 때 TPLAN 같이 자동적으로 정상상태 계통 신뢰도를 계산할 수 있는 프로그램이 필요할 것으로 사료된다.

본 논문은 2003년도 전력산업 기술인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] X.Y.Chao, R.R.Austria, etc, " Practical Determination of Operation Transfer Limits", IEEE 1995
- [2] S.Iwamoto, Y.Tamura, "A Load Flow Calculation Method for Ill-conditioned Power Systems", IEE Trans. Vol. PAS-100 No. 4, April 1981
- [3] T.A.Mikolinnas, B.F.Wollenberg, "An Advanced Contingency selection Algorithm", IEEE Trans. PAS-100, No.4, April 1981
- [4] PSS/E, ver. 28, 2002