

계통계획기준 수립을 위한 한전계통의 성능평가

국경수*, 오태규*, 김태현*, 김학만*, 방민재**, 이병준***
 한국전기연구원*, 한국전력공사**, 고려대학교***

Performance Evaluation of Korean Power System for Developing the Planning Standards

Kyung-Soo Kook*, Taekyoo Oh*, Tai-Hyun Kim*, Hak-Man Kim*, Min-Jae Bang**, B. Lee***
 KERI*, KEPCO**, Korea Univ***

Abstract - This paper is part of an ongoing project of KEPCO; 'A Study on Criteria and Standards for Transmission System Planning'. The objective of this project is to develop the standards and procedures for transmission system planning. This involves reviewing published literatures, other documents of existing criteria and procedures, and various case studies of advanced countries which are already under the competitive electricity industry.

This paper presents the result of evaluating Korean Power System as a pre-study for developing the Planning Standards of Korean Power System. For this, WSCC/NERC's performance criteria for planning transmission system, and KEPCO's 'Long Term Transmission System Planning Criteria' are considered. By doing this, the level of performance criteria which should be applied to Korean Power System and the detailed procedures which would be used in system test were reviewed.

1. 서론

전력산업에서 연간 수 조원 규모에 달하는 설비투자의 의사결정에 기본 논리를 제공하는 전력계통 계획기준의 객관화 및 명문화화를 통한 전력계통계획의 공신력 확보에 대한 필요성은 그 동안에도 지속적으로 제기되어 왔다. 더욱이 전력산업의 구조개편에 의한 경쟁적 전력산업 환경이 도래됨에 따라, 기존의 전력계통 계획기준의 객관화에 더하여 변화된 전력시장의 질서를 반영한 계획기준의 재정립에 대한 필요성이 제기되고 있다.

특히, 계획기준에서 다루어질 전력망의 성능기준은 전력망에 요구되는 최소한의 기술적 요구조건으로써 계통계획에서 이를 만족시켜야 할 뿐만 아니라 전력망의 확장이나 보강에 대한 요청 그리고, 계통의 운영과 전력망 사용자들의 접속 등 향후 예상되는 다양한 상황에서 객관적인 기술 기준으로 적용될 것이다.

해외 선진국의 경우를 살펴보면 이러한 성능기준이 시장규칙 등에 명시되어 있으며 이는 전력시장의 소비자들에 대한 설문조사를 통한 부하민감도 곡선의 구성, 계통계획 및 운영경험을 통한 Know-how(경제성을 포함한), 계통운영 전략과의 협조 등을 통해 정해지고, 이를 위한 소그룹(또는 위원회)이 구성되어 꾸준히 검토되고 있다.

반면, 우리나라의 경우에는 그동안 계통계획에 있어서 전력망의 성능에 대한 기술적 평가작업이 전력회사 내부적으로 이루어져 왔기 때문에 객관적인 성능기준의 수립을 위한 선행연구가 충분히 이루어지지 못한 것이 사실이다.

본 논문에서는 우리나라의 객관적인 전력망 성능기준을 수립하기 위한 사전작업의 하나로 한전의 계통계획에 대한 성능평가를 일련의 절차를 통해 수행함으로써 향후 계통계획에서 다루어질 성능망 기준의 적정성을 사전에 검토해 보고 그 과정을 통해 평가절차에 대해서도 재검토해 보는 기회를 가지고자 한다. 이를 위해 비교적 객관적인

고 합리적인 북미신뢰도 위원회(NERC) 산하 WSCC의 송전계통 계획을 위한 성능기준과 한전의 장기 송변전설비 계획기준(안)의 평가항목들을 적용하여 한전의 계획 계통을 평가하고 그 결과를 검토해 보기로 한다. 또한, 본 논문에서 사용된 대상계통은 임의의 계통상태를 가정한 것임으로 그 결과의 해석에 제한이 두어져야 함을 명시한다.

2. Base Case 요약

- 대상계통 : 2003년 하계 첨두부하시
- 계통의 구성

모선	발전	부하	선로	변압기	직렬	FACTS
모선	모선	모선	선로	선로	선로	기기
868개	184개	679개	1,734개	347개	0개	0개

- 발전기 총 출력 : 48,665.0[MW], 14,457.7[MVAR]
- 총 부하(정전력) : 47,900.8[MW], 22,198.0[MVAR]
- 모선 Shunt : -10,458.9[MVAR]
- 선로손실

전압단계[kV]	선로개수	MW	MVAR
765.0	4	11.03	282.87
345.0	183	465.60	7848.69
154.0	1363	287.25	4066.02
이하	184	0	5464.04
합계	1,734	763.88	17,661.62

3. 건전상태 해석

대상계통에 대해 건전상태에서 조류계산¹⁾을 수행한 후 모선의 전압과 선로의 부하율을 확인하였다. 이때 모선의 전압이 다음 표3.1의 범위이내에 있고²⁾, 선로의 부하율이 100%를 초과하지 않는 것을 원칙으로 하여 이러한 상태를 계통의 성능평가를 위한 Base Case로 정의하였다.

표 3.1 Base Case의 모선 전압 기준³⁾

전압 단계	전압범위[kV]	전압범위[pu]	비고
154kV	156~164kV	0.975~1.025 (160kV 기준)	peak
	152~160kV	0.974~1.026 (156kV 기준)	off-peak
345kV	336~360kV	0.974~1.043 (345kV 기준)	.

1) 변압기 탭 : 고정, Switched Shunt : 조정
 2) 본 논문에서는 154kV 모선에 대해 154kV 전압을 기준으로 한 0.975~1.025[pu] 범위를 표 3.1의 범위와 함께 적용하였다.
 3) 계통운영처 계통전압유지기준

또한 이때 이러한 Base Case의 준비에서는 계통내의 변압기 tap ratio의 조정을 허용하고, 적절한 경우에는 모선의 Switched Shunt의 추가도 고려하였다.

이와 같은 방법으로 대상계통에 대한 건전상태 해석을 수행한 결과 모든 모선과 선로가 정해진 기준을 만족하였다.(Base Case로 정의)

4. 상정사고 해석

4.1 상정사고

상정사고 해석을 위해서는 먼저 이를 위한 상정사고가 정의되어야 하며 이러한 상정사고들은 그 가혹도에 따라 각각 다른 수준의 기준이 적용되어야 할 것이다. WSCC/NERC의 성능기준의 경우 이러한 상정사고를 그 발생확률에 따라 분류하여 자주 발생되는 상정사고에 대해 더욱 가혹한 기준을 적용하고 있는데 본 논문에서는 이를 참고하여 상정사고를 그 가혹도에 따라 다음과 같이 구분하였다.

표 4.1 상정사고의 분류

단계	구성요소의 탈락
A	발전기 1기, 선로 1회선, 변압기 1기
B	선로 1회선+발전기 1기 동일 타워내가 아닌 1회선 선로 2개의 동시 탈락
C	발전기 1기+변압기 1기 선로 2회선 +변압기 1기 동일 타워내의 2회선 선로의 동시 탈락

또한, 상정사고의 선택을 위해 대상계통의 모든 345kV 선로를 대상으로 각 선로의 탈락에 대한 선로과부하와 전압분포 측면의 감도해석을 통해 상정사고의 순위를 결정한 후, A와 B단계의 가장 가혹한 상정사고 2개를 다음과 같이 선택하였다.

표 4.2 계통의 성능평가를 위한 상정사고(선로탈락)

번호	시작모선		끝모선	
	모선번호	모선이름	모선번호	모선이름
#1	1400	양주3	3151	서인천
#2	6450	신집재3	7151	영광NP#2
#3	1400	양주3	3151	서인천
	6151	보령	6950	아산

4.2 과도 후(post-transient) 조류계산 결과

일반적으로 과도 후 조류계산에서 검토되는 외란은 과도적으로 안정한 경우를 전제로 한다. 또한, 과도 후 해석은 외란 발생 이후에 충분한 시간이 흐른 후를 가정하며 과도 후 해석에서 모의되는 시간은 전력과 전압의 과도 동요가 감쇠된 이후로부터 계통 운영자가 계통연계 등을 포함한 계통조정을 수동으로 할 수 있는 시간 이전까지로 한다.

본 논문에서는 대상계통에 대해 과도 후 조류계산을 수행하여 다음 표 4.3의 값을 기준으로 모선전압의 변동율과

표 4.3 과도 후 조류계산 검토기준⁴⁾

사고단계 항목	A단계	B 단계	비고
전압변동율	5%	10%	Base Case 기준
선로과부하	120%	120%	비상정격

4) WSCC/NERC의 송전망 성능기준을 적용

선로 부하율의 변동을 확인하였다. 또한 이를 위해서는 계통의 모든 모선에 대한 상정사고 적용 전과 후에 대한 전압의 비교가 필요한데 본 논문에서는 이를 Macro Programming⁵⁾으로 처리하였다.

대상계통에 대한 과도 후 조류계산 결과는 다음과 같다.

표 4.4 과도 후 조류계산 검토결과

상정사고 검토항목	#1	#2	#3
전압변동	기준 만족	조류계산	기준 만족
선로과부하	기준 만족	발산	기준 만족

5. 과도 안정도 해석

과도 안정도 해석에서는 모선의 지락사고에 대한 차단기의 동작으로 선로가 개방되는 경우를 모의하며 이때 고장 감지 후 선로개방까지의 고장제거시간은 일반적인 차단기의 응답시간인 6사이클(0.1초)을 사용하였고 개방된 선로의 재폐로를 고려하지 않은 상태에서 과도안정도를 검토하였다.

5.1 Damping

본 논문에서는 과도 안정도 해석을 통해 얻어지는 발전기 상대위상각 곡선에서 곡선의 최대 값의 점들을 연결하는 선과 곡선상의 최소 값의 점들을 연결하는 선이 서로 교차하게 되는 경우를 正 제동인 것으로 정의하였다. 또한 해석의 정확도를 기하기 위해 계통의 모든 발전기들을 감시하여 동요의 감쇠를 확인하였다.

대상계통에 대한 과도안정도 검토 결과 사고 #1과 #3 모두에 대해 계통의 모든 발전기들이 正 제동을 나타내었다.

5.2 과도전압강하

외란 발생 직후에 대해 부하모선의 과도 전압강하를 확인하였다. 이는 일반적으로 외란 발생전의 모선전압을 기준으로 과도기간 동안 모선의 전압이 초기치의 일정 비율 이내로 유지되는지를 확인하는데 본 논문에서는 계통의 전 부하모선에 대해 다음과 같은 기준을 적용하여 모선의 과도전압 강하를 확인하였다.

표 5.1 과도 전압 강하 기준⁶⁾

사고단계 항목	A단계	B 단계	비고
과도전압 강하율	25%	30%	Base Case 기준 부하모선 측정

검토 결과 상정사고 #1과 #3의 모든 경우에 계통내의 대부분의 부하모선에서 고장발생 직후에 전압이 급격히 떨어졌다가 고장이 제거된 이후에 전압이 회복되었는데, 이때 선로탈락의 시나리오로 모선고장이후 차단기에 의한 선로 트립을 사용하였으므로 이러한 절차와 함께 과도전압강하 문제에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

5.3 최소 과도 주파수

외란 발생 직후에 대해 부하모선의 최소 과도주파수를 확인하였다. 이러한 최소 과도주파수는 계통운영상의 UFLS 전략 등과 연관되기 때문에 부하차단의 허용범위와 관련하여 그 기준치를 설정하게 된다. 이를 위해 본 논문

5) PSS/E 프로그램에서는 IPLAN을 이용함

6) WSCC/NERC의 송전망 성능기준을 적용

에서는 다음과 같은 최소 과도주파수 기준을 적용하였다.

표 5.2 최소과도 주파수 기준

항목	최소	부하차단의 허용범위
사고단계	과도주파수	
A단계	58.8Hz	부하차단을 허용안함
B단계	58.5Hz	차단가능 부하의 부하차단을 허용

검토 결과 상정사고 #1과 #3의 모든 경우에 과도 주파수가 적용된 기준이상으로 유지되었다.(사고#1에서의 최소 과도 주파수 : 59.19Hz(동두천 154kV모선), 사고#3에서 최소 과도 주파수 : 59.10Hz(은평 154kV모선))

6. 전압 안정도 해석⁷⁾

본 논문에서는 계통의 전체 부하 및 전체 발전 증가 시나리오를 적용하였으며 부하모델의 변환⁸⁾(정전류 및 정임피던스 부하 포함)과 Switched Shunt조정의 적용을 고려하였다.

6.1 PV곡선을 이용한 MW 여유 산정

PV곡선의 구성에 있어서는 발전기의 설비용량을 무제한 상태에서 계통에 의해 최대로 공급 가능한 부하를 산정 하였으며 대상계통에 대한 해석 결과는 다음과 같다.

표 6.1 MW 여유 산정 결과

CASE	운전부하 [MW]	최대부하 [MW]	MW여유 [%]
건전상태	47,900.84	49,422.79	3.80
사고 #1	47,900.84	49,000.92	2.25
사고 #3	47,900.84	48,501.01	1.24

여기서, WSCC/NERC의 송전망 성능기준의 경우에는 MW여유로 'N-1'수준의 외란에 대해 5%, 'N-2'수준의 외란에 대해 2.5%이상을 요구하고 있어 이와 비교할 경우 MW여유가 다소 부족할 수 있다고 판단된다.

6.2 QV곡선을 이용한 MVAR 여유 산정

QV곡선은 모선별로 구해지기 때문에 가장 불안정한 모선의 QV곡선으로 MVAR 여유를 산정해야 한다. 본 논문에서는 편의상 탈락되는 선로의 시작모선과 끝모선에 대한 QV곡선을 구하여 MVAR 여유를 산정하였다.

표 6.2 MVAR 여유 산정 결과

CASE	감시모선	모선전압	MVAR 여유
건전상태	양주3	0.73	3332.26
	서인천	0.68	2936.30
사고 #1	양주3	0.66	2891.29
	서인천	0.69	1974.30
사고 #3	양주3	0.69	2336.37
	서인천	0.72	1828.72
	보령	0.76	1280.96
	야산	0.80	2179.63

여기서 MVAR여유를 산정하기 위한 감시모선의 선택방법이 정해져야 할 것이며, WSCC/NERC의 성능기준에서는 5%의 부하증가에 대해서도 MVAR 여유가 존재할 정도의 수준을 요구하고 있다.

7) 본 논문에서는 PSAPAC 프로그램을 사용함

8) 한전에서 사용하는 기본 비율을 적용함

7. 결론

본 논문에서는 우리나라의 계통계획기준의 설정을 위한 사전작업으로써 비교적 객관적이고 합리적인 북미신뢰도 위원회(NERC) 산하 WSCC의 송전계통 계획을 위한 성능기준과 한전의 장기 송변전설비 계획기준(안)의 평가항목들을 적용하여 일정한 가정하에 한전의 계획 계통의 성능을 평가하고 그 결과를 검토하였다. 이를 통해 우리나라의 객관적이고 합리적인 계획기준과 절차를 수립하기 위한 기본 자료가 준비되고 세부내용이 검토되었다고 생각된다. 앞으로의 경쟁적 전력시장에서 계통계획에 요구될 객관성과 합리성을 만족시키기 위해서는 이를 증명하기 위한 합리적이고 투명한 계획기준과 성능평가가 요구될 것은 자명하다. 따라서 우리나라의 여건을 적절히 반영하는 계획기준과 이의 만족여부를 합리적인 평가하기 위한 절차를 위한 준비가 필요할 것이다.

본 논문에서 한전계통의 성능평가를 수행한 결과 북미계통에서 적용되고 있는 성능기준을 적용하였을 경우, 그 절차상의 선택사항에 따라 결과가 다소 달라질 수 있다고 하더라도 상정사고 해석과 과도 전압강하, 전압안정도 측면 등에서 이러한 기준을 만족하지 못하는 부분이 나타났으며, 이를 위한 평가 과정에서도 이러한 객관적인 계통평가를 위해서는 보다 효과적이고 정확한 절차가 요구됨을 확인하였다.

또한 이를 수행중인 '전력계통계획 수립기준에 관한 연구' 과제의 결과 도출에서 참고하고자 한다.

8. 참고문헌

- [1] "NERC Planning Standards", NERC, 1997
- [2] "California Operating Studies Subcommittee Handbook", California ISO, 1998
- [3] "WSCC Planning Standards", WSCC, 1999
- [4] "2002, 2005 and 2008 Summer Peak Northern System Analysis", California ISO, 2001
- [5] "ISO Grid Planning Criteria", California ISO, 1999
- [6] "Voltage stability criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology", WSCC
- [7] "1998-1999 Winter South-to-North Operating capability study report, California Operations Studies Subcommittee
- [8] 'Supporting Document for Reliability Criteria for Transmission system Planning', WSCC Reliability Subcommittee, 1994.
- [9] "Contingency Planning", KEPCO Restructuring Program Technical Advisor, 2001.
- [10] "장기 송변전 설비계획 기준", 한전 전원계획처 계통기술부, 1999. 11.
- [11] "전력계통계획 수립기준에 관한 연구(중간보고서)", 한국전력공사, 계통계획실, 2001.2
- [12] "한전의 계통계획 절차서 및 기준서", 한국전력공사 계통계획실, 2000. 7
- [13] PSS/E User's Manual, PTI
- [14] PSAPAC User's Manual. PowerTech