

전압안정도로 제약된 계통에서 최적조류계산해가 과도안정도에 미치는 영향

이근준*, 김발호
충북과학기술대학*, 홍익대

The effects of SCOPF solution to Transient Stability on Voltage Limited Power System

Geun-Joon LEE*, Bal-Ho Kim
Chungbuk Provincial College, Hongik University

Abstract - This paper presents a series of simulation results of transient stability on SCOPF operated power system whose transmission capabilities are limited by voltage stability. Three steps of voltage security guidelines, 5[%], 7[%], 10[%] are introduced to increase power transfer from generation centers to load center and observed the effects of voltage guidelines to transient stability for three kinds of load level(peak, medium, off-peak). As a result, dynamic characteristics weren't affected by the voltage security limits in model system, but became worse for the off-peak level than peak case, and sustain oscillations are observed for the all load level.

This gives us some intuitions for the development and applications of security limits to use SCOPF program in open electric market.

1. 서 론

전력산업은 그 공익성으로 인하여 정부주도형 독점사업으로 운영되어 왔지만, 효율성 증진, 새로운 자본의 유치 등과 같은 경제적 필요가 강해짐에 따라 세계적으로 구조개편의 바람을 타고 있다. 그러나 최근의 미국 캘리포니아주에서 발생한 빈번한 정전사고[1]는 독점이나 담합등으로 인한 발전시장의 왜곡, 또는 계통안전성 평가 미비로 인한 송전계통 불안정이 초래되는 경우 대규모 정전에 의한 사회비용의 증가를 가져올 수도 있다는 것을 시사하고 있다.

따라서 전력계통의 안전성 평가는 전력시장의 기능이 강화될수록 엄밀해져야 할 것이며, 전력수급 정책 수립시 일정 수준의 안전성을 확보할 수 있게하는 안전성 평가 지표의 개발, 유효, 무효예비력 등 보조서비스에 대한 연구와 시장 매커니즘과의 연동 방안에 대한 연구들이 각 계통의 특성을 고려하여 수행되어야 할 것이다. 특히 무효예비력은 유효전력과는 달리 협소한 지역에서 확보해야 하므로 보통 1년 이상의 장기계약에 의해 확보하고 있으며, 보상방법도 유효전력판매에 지장을 줄 경우에 한하여 보상하는 방법을 취하고 있으므로[2] 적정 무효예비력의 확보 방안에 한계가 있지 않을 수 없다.

본 논문에서는 전력계통의 수송능력이 전압안정도에 의해 제약을 받고 있는 경우, 안전성 제약 조건을 전압으로 둔 최적 조류계산을 수행, 발전력을 배분하여 운전할 경우 과도안정도가 어떻게 영향을 받는가 하는 것을 분석해 보고자 한다. 모의 대상으로는 1998년도 우리나라 전력계통에서 복잡조류 수송선로의 송전용량이 전압안정도에 의해 제약을 받고 있는 점을 감안, 안전성 제약조건을 허용 전압변동율로 주고 최적조류계산 해를 구한 다음, 전압제약조건을 완화시켜가면서 수송전력의 증가시킨 경우 동일한 상정사고가 과도안정도에 미치는 영향을 침두부하, 중부하, 경부하 계통에 대해 모의하였다.[3]

2. 문제의 접근

2.1 검토방법

전통적으로 전력계통의 안전성 문제는 부하요구를 충족하기 위한 적정 발전 및 송전용량의 문제를 취급하는 정적 안전성 관점에서 다루어왔으며, 최적조류계산은 정적 안전성을 보장하는 계통운영정책을 제공하는 도구로서 널리 보급되고 있다[4]. 그러나 다변화되고 유동적인 시장체제하에서 안전성을 일의적으로 설정할 수 있는 가이드라인을 찾는 것은 점점 어려워져가고 있으며, SCOPF는 표1에 의하면 Level 1의 해를 가지지만 실제 운영상에서는 제어에 의해 보다 경제적인 Level 2의 상태로 운전하게 되므로 최적조류계산시 계통붕괴를 막기위한 상황대응적인 동적 안전성마진의 설정이 필요하다.

표 1 전력계통 정적안전성 수준

안전성수준		안전성 평가조건
level 1	Secure	① 전전상태에서 모든 안전성 한계 만족, 전 부하 공급 ② 상정사고시 안전성 한계 만족
level 2	Correctively secure	level 1의 ① 만족, level 1의 ②는 제어로서 조건 만족
level 3	Alert	level 1의 ① 만족, level 1의 ②는 부하손실없이 제어 불가
level 4	Correctable Emergency	① 전전상태에서 전부하 공급, 안전성계약 위반 ② 부하손실없이 제어로 제약조건 만족
level 5	Non-Correctable Emergency	level 4의 ① 만족, level 4의 ②는 부하손실없이 제어 불가
level 6	Restorative	부하손실 수반하여 운영계약 만족가능

그림 1은 본 연구에서 예정된 작업 흐름도이다. ()안의 작업은 미완성 상태이므로 추후에 수행될 것이다.

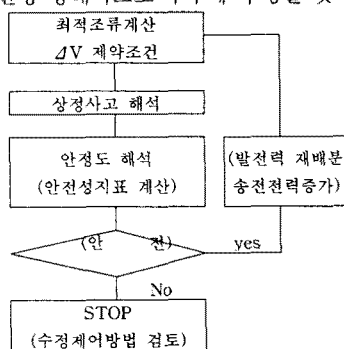


그림 1. 작업 흐름도

2.2 제약조건의 설정

우리나라의 전력계통 운용기준은 345kV 및 154kV 송전선로 병행 2회선(1루트) 또는 345kV Auto Tr. 1뱅크가 고장난 경우에 대하여 과부하를 초래하지 않으면서 계통 전압이 정상운전시 0.95-1.043, 30분 이내의 단기간에는 0.90pu 까지 허용하는 전압기준과 345kV 계통의 모선상에 3상단락사고가 6[Hz]동안 지속된 경우 불안정 발생여부를 검토하는 안정도 기준을 적용하고 있다.

WSCC의 신뢰도기준의 성능기준[표 1] C(계통에 심각한 역효과를 발생하는 수준으로 Firm or Interruptible 부하의 차단이 가능하지만 모든 실비는 비상한계치 범위내에서 운전)에서는 2회선, 발전기2기가 탈락한 경우 과도전압은 최대 30%, 과도후 전압변동한계는 10%, 주파수 변동폭 1[Hz] 이내로 규정하고 있다.

표 2. WSCC의 계통외란에 따른 성능기준표

Performance Level	Disturbance Outage Class	Outage Frequency (outage/year)	Mean-Time-Between-Failure (year)	ΔV_i (%)	δ_i (cycle)	L_{in} (ft)	ΔV_i (%)	L_i (s)	Damp. (%)
A	Single Element	0.135	53	.25	20	59.6	5	Yes	>0
B	Bus Section	0.033 - 0.33	3 - 30	30	20	59.4	5	Yes	>0
C	Two Element	0.033 - 0.33	3 - 30	30	40	59.8	10	Yes	>0
D	Mean time Two Elements-Type 1	0.0033 - 0.0033	30 - 300	NO CASCADING PERMITTED					
E	Mean time Two Elements-Type 2	< 0.00033	300 <	EVALUATE FOR RISKS & CONSEQUENCES					

Note: Refer to Table 1 for definitions

따라서 본 연구에서 최적조류계산 해를 얻기 위한 안전성 제약조건으로 모선 전압을 선택하고 허용변동범위를 5%, 7%, 10%로 가변시켜 이에 따른 수송전력의 변화를 검토하였다.

3. 최적조류계산

SCOPF로 해를 얻은 결과는 표 3과 같다. 각 전압제약에 대하여 ELD, OFF, SCOPF의 해를 구하고 연료비용을 상호 비교해 보았다. 계산에 사용된 프로그램은 신뢰성과 객관성을 위하여 세계적으로 많이 사용되고 있는 비선형 최적화 프로그램인 MINOS5와 CONOPT를 사용하였다.

29000[MW] 및 35000[MW] 부하에서는 복상조류가 24000[MW]에 비해 상대적으로 낮아졌는데 이는 SCOPF의 제약조건에 의한 것이다. 복상조류는 전압제약을 완화함에 따라 큰 증가를 보이지 않는다. 발전비용은 전압제약이 강화됨에 따라 증가추이를 보이고 있다. ED→OPF간 전환시 운전비용은 부하증가에 따라 1.066-1.263의 비율로 증가함으로써 제약조건해소를 위한 추가비용이 최고 26%정도 발생됨을 관측할 수 있다.

표 3. 복상조류량 및 발전비용 (단위 : 억원)

부하수준[MW]	SC OPF		ED (A)	OPF(B)		SCOPF(C)	
	안전성 제약	복상조류		발전비	B/A	발전비	C/A
24000	5%	5497	4.8111	5.1302	1.066	5.1302	1.066
	7%	5463		5.1275	1.066	5.1275	1.066
	10%	5466		5.0325	1.046	5.0325	1.046
29000	5%	4027	6.5726	7.3538	1.119	7.3538	1.119
	7%	4313		7.1403	1.086	7.1438	1.086
	10%	4211		6.9224	1.053	6.9224	1.053
35000	5%	3362	7.2981	9.2205	1.263	9.2205	1.263
	7%	4203		9.1890	1.259	9.1890	1.259
	10%	4253		9.1258	1.250	9.1258	1.250

4. 과도안정도해석

4.1 고장조건

복상조류와 최적조류계산에 의해 주어진 기본케이스에 대해 시간영역의 과도안정도 해석을 수행해보았다. 상정 사고는 주요복상조류 수송 1루트의 부하측 모선 근단에 3상단락사고가 발생하여 0.1초간 고장이 지속된 후 선로가 개방된 것으로 가정하였다. 대상선로는 표 4와 같이 선정하였다.

표 4. 루트 상정사고 세트 선정 결과

고장번호	선로		비고
	from	to	
①	4600	6950,4400	루트사고
②	2500	5700	
③	4600	6800	
④	2500	4900,4700	

4.2 해석결과

표 2의 기본케이스에 대해 PSS/E 프로그램을 사용하여 과도안정도를 모의한 결과를 표 5로 제시하였다.

표 5. 과도 안정도 모의 결과

부하수준[MW]	SC OPF 전압제약[%]	복상조류[MW]	전압안정도한계[MW]	상정사고(route trip)				판정
				①	②	③	④	
24000	5%	5497	4663	~	~	~	~	~
	7%	5463	4657	x	~	x	x	x
	10%	5466	4709	x	x	x	x	x
29000	5%	4027	4617	o	o	o	o	o
	7%	4313	4656	~	~	~	o	~
	10%	4211	4761	~	~	~	~	~
35000	5%	3362	5145	~	~	~	~	~
	7%	4203	4977	~	~	~	~	~
	10%	4253	4477	~	~	~	~	~

범례 ○ : 안정, ~ : 임계동요, X : 불안정
안정도 모의 결과 전반적으로 기저부하(24,000MW), 중간부하(29,000MW), 첨두부하(35,000MW)시의 계통에 대해 제 1과 안정도 개념에서는 과도적으로 안정하였다. 또 전압제약조건을 변경하여 본 결과, 기저부하시에는 영향을 주었으나, 이외 다른 부하에서는 큰 변동을 보이지 않았다. 이는 기저부하시 복상조류가 전압안정도 한계조류를 상회하고 있고, 약 절반에 해당하는 조류를 상정사고①/T/L이 부담하고 있는(2600MW) 상황에 기인한 것으로 보인다.

29000MW 중간부하의 경우는 기저부하보다는 양호한 특성을 보이고 있다. 전압제약조건을 5-7%로 증가시킨 경우 발전기의 위상각의 특성(그림 2, 3) 및 선로조류(그림 4, 5)는 악화되었는데 이는 경제적 발전력 배분기회의 증가로 운전비가 절감되는 반면 원거리 송전이 증가한 현상으로 볼 수 있다.

35,000MW 첨두부하시는 전압제약을 5%~10%로 증가하여도 타 부하조건에 비해 계통의 특성에 뚜렷한 변화를 초래하지 않았다. 이는 상대적으로 많은 발전기가 운전되면서 전압제약조건이 계통의 경제성에 주는 영향이 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 그림 6, 7은 전압제약조건이 5%일때와 10%일때의 선로유효조류의 동특성으로 전반적인 특성은 거의 동일하지만 후자의 경우 4초 부근의 특성이 상호 달라지는 것을 볼 수 있다.

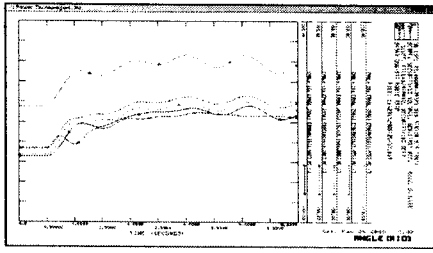


그림 2 위상각(29000MW,5% dV ,2500-5700 2, 중부지역)

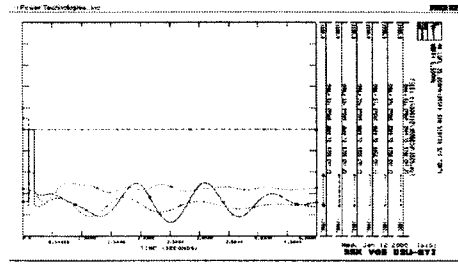


그림 6 35kV 5% 25-47 2 선로유효조류

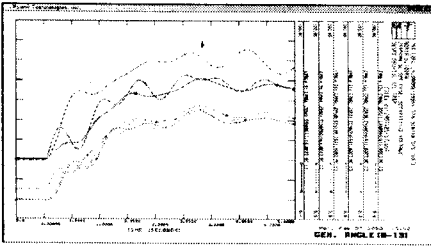


그림 3 위상각(29,000MW, $dV=7\%$, 2500-5700 2중부지역)

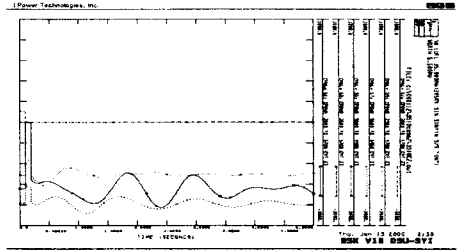


그림 7 35kV 10% 25-47, 선로유효조류

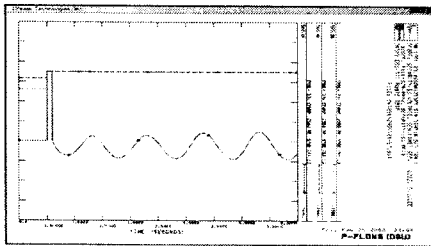


그림 4 29000MW, 5%, 25-47, pflow, 동서울

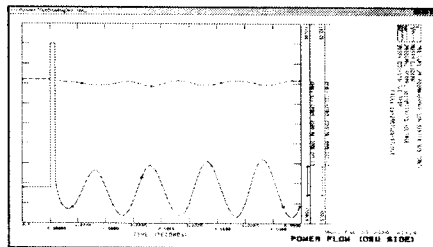


그림 5 29000MW,7%,25-47, 동서울측

5. 결 론

전압안정도로 제약되는 계통에 3단계 전압마진으로 안전성제약을 주어 구한 SCOPF해에 대하여 제한된 범위 내에서의 과도안정도 분석을 시도해보았다.

이 경우 전압제약조건 완화가 발전단과 부하단을 연결하는 주송전선로의 조류증가에 주는 영향은 미약했는데 이는 SCOPF의 전압안전성 제약에 대해 원거리 발전력보다 부하근단 발전력이 경제성이 있다는 것을 의미한다.

주송전선의 조류증가가 크지 않으므로 동일한 상정사고에 대하여 제 1과 안정도 개념에서의 과도안정도상 변화는 적었다. 그러나 동요모드가 관측되었는데 이는 실제 현상인지 규명되어야 한다. 각각의 부하 case와 전압안전성 제약조건에 따라 발전기 위상각, 조류, 전압등이 다양하게 변화하므로 이들간의 상관관계를 결정할 수 있는 안정도평가지표의 개발 및 광범위하고 심도있는 계통해석이 필요하다.

안전성 제약조건은 운전비에 직접적인 영향을 주므로, 본격적인 전력시장의 운용에 앞서 최적조류계산의 적용을 위한 최적 정적 안전성 연구 및 동적안전성 연구가 선행되어야 함은 물론 이를 뒷받침할 선로, 발전기 및 조상설비등의 물리적 특성 및 제어특성에 대한 조사를 수행하여 계통의 적응능력을 향상시켜야 한다.

[참고문헌]

- [1] Report of Black-out of Bay area in California, Aug. 2000.
- [2] 폴탁송모형에서의 Ancillary 서비스확보 및 송전선 혼잡시 전력계통 운용방안에 관한 연구(최종) 한국전력공사, 기초전력공학공동연구소, 1999.8
- [3] 계통운용상의 적정송전능력 산정에 관한 연구, 한국전력공사, 기초전력공학공동연구소, 2000.1
- [4] M.E.따-Hawary et.el. "Optimal Power Flow:Solution Technique, Requirements, and Challenges", IEEE Tutorial Course, 1996 IEEE Power Engineering Society