

안정도 향상을 위한 한전계통에서의 FACTS 투입 방안 모색

강상균, 이병준, 권세혁 송화창 윤중수, 장병훈
고려대학교 군산대학교 한국전력연구원

Investment method of FACTS for improvement of stability for KEPCO System

Sanggyun Kang, Byoungjun Lee, Sae-hyuk Kwon Hwachang Song, Jongsoo Yoon, Byunghoon Jang
Korea University unsan National University KEPRI

Abstract - 본 논문에서는 전압 불안정성을 해소시키기 위한 방안으로 FACTS를 투입하기 위한 방안에 대하여 논의 하였다. 우선적으로 전압안정도 기준을 수립하고 상정사고에 대하여 PV 해석을 실시하고 전압안정도 기준을 만족시키지 못하는 사고를 스크리닝 한다. 각 상정 사고에 대하여 선정된 전압안정도 기준을 만족하도록 하기 위한 FACTS 투입 방안에 대하여 논의하였다. 일반적으로 전압안정도 측면에서 취약위치를 선정하는 방법으로 VQ해석이나 Tangent vector에 의한 Bus sensitivity를 구하여 부하변화에 대한 전압 감도 (dV/dP_{TOTAL})가 큰 모선을 취약 위치로 선정하는 방법, 또는 Modal Analysis를 통해 구한 참여인수값이 큰 모선을 취약 모선으로 선정하는 방법이 있다. 이 논문에서는 VQ해석과 Tangent vector를 이용한 해석 방법을 이용하여 전압안정도 측면에서 취약 위치 및 전압안정도 향상을 위한 FACTS 투입 후보지를 선정하였고 전압안정도 기준을 만족시키기 위해 각 후보지에 투입해야 할 FACTS 용량을 산정하였다. 마지막으로 실질적으로 수도권 주요 모선에 모두 FACTS를 투입한 결과와 논문에서 사용한 방법과의 결과를 비교하여 적절한 절차를 사용하여 FACTS가 투입되었음을 확인하였다.

서는 FACTS 기기가 계통에 미치는 영향을 정확히 평가, 분석하고 주변 계통 상황에 따라 적절한 운용 전략을 수립해야 할 필요성이 있다.

지속적인 전력수요의 증가와 이에 따른 발전설비의 확충으로 우리나라 전력 계통은 복잡하고 고도화된 대규모 전력망으로 발전하고 있다. 전력수요는 수도권 지역과 영남 지역에 편중하여 성장하고 있으며, 발전설비는 입지 개발 및 확보의 어려움으로 기존 지역에 추가 건설되어 대단위 발전단지로 성장하고 있다. 전력계통 측면에서의 이러한 부하 중심지와 발전단지를 효과적으로 연계하기 위한 계통 구성과 안정적인 계통운영이 주요 문제가 되고 있다.

수도권 지역의 전력수요 집중과 전력 수송밀도 증대로 수도권으로 전력을 수송하는 전력계통의 과도 안정도 및 전압 불안정 문제가 증대될 것으로 예상되며, 이로 인한 전력수송 제약에 따른 계통 혼잡비용의 증가가 우려된다. 이와 같은 관점에서 우리나라에서도 부하 밀집 지역인 수도권 지역 계통의 구조적 특성에 따른 전압 불안정 문제에 대한 대책으로서 중부하시 적정 전압의 유지뿐만 아니라 중부하시 전압 상승 및 계통 고장시 전압 안정성 유지 등에 대한 신속하고 효과적인 대비가 필요하다. 이에 FACTS 기기는 이러한 문제점의 대안이 될 수 있을 것이다.

1. 서 론

현재 우리나라는 지속적인 경제 성장과 생활수준의 향상으로 인하여 전력수요가 급격하게 증가하고 있다. 이러한 전력수요를 충족시키기 위해서는 새로운 발전소를 건설하고, 전력전송설비를 증대시켜야 한다. 그러나 이러한 작업들은 환경과 지리적인 문제 등 여러 가지 사회적, 경제적 제약이 따르고 있다. 이에 따라 기존에 설치된 대규모 송전망을 큰 변경 없이 활용하면서 자연 조류방식이 갖는 여러 가지 제약조건을 해결하고, 전송효율을 극대화하며 기존의 전력설비를 보다 효율적으로 이용할 수 있는 고속, 정밀한 전력조류 제어 기술의 확보가 시급한 실정이다. 이러한 상황에서 유연송전시스템(FACTS)은 전력 조류를 자유로이 조절하여 송전량 수송 능력과 설비 이용률을 향상시켜 전력시스템을 안정하게 운영하는 데에 큰 도움이 될 수 있다. 선진 각국에서는 이미 FACTS에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔고 실제 계통에 응용하고 있다. 우리나라도 그간의 연구를 바탕으로 강진 변전소에 UPFC를 설치하여 가동하기 시작했으며, 앞으로도 FACTS 기기는 확대 적용될 것으로 예상되고 있다.

FACTS 기기가 전력계통에 설치될 경우 그 특성이 기존 계통과는 확연히 달라질 수밖에 없으므로 대규모적인 적용을 위해서는 정밀한 해석기술을 바탕으로 한 운용 및 제어기법을 필요로 한다. 그간의 연구를 통하여 FACTS 기기의 모델링 및 해석 기술이 개발되어 왔는데, 향후 FACTS 기기의 대규모적인 계통 적용을 위해

2. 본 론

2.1 전압안정도 해석 개요

전력계통에는 전압 level에 따라 수송할 수 있는 전력의 한계가 존재하게 되는데 이는 기본적으로 전력계통의 임피던스에 의한 전압 저하 때문이다. 부하의 증가에 의해 전력수송 한계를 초과하게 되면 전압 저하가 급속하게 진행되고 이로 인해 국지적/광역적으로 정전이 발생하게 되는데 이를 전압 불안정 현상이라고 한다. 정량적인 지수를 이용하여 현재의 계통 상태를 간단하게 판별할 수 있는데 전압안정도 측면에서 주로 사용되는 지수는 유효전력여유, 무효전력여유, L-지수, Z-지수, Singular value가 있다.[2]

2.1.1 유효전력여유(PV analysis)

유효전력 여유 해석은 계통의 부하 또는 용동조류와 모선 전압과의 관계로써 전압 안정도 여유를 산정하는 정상상태 해석 기법이다. 일반적으로 부하가 증가함에 따라 전압이 서서히 감소하다가 최대전력 전송량(knee point)을 넘어서게 되면 계통이 붕괴하게 된다. PV 해석은 일반적으로 전지역 부하증가와 전지역 발전증가 시나리오로 진행되지만, 부하지역과 발전지역이 원거리로 구분되는 지역에서 부하단과 발전단 사이의 선로를 통해 증가시킬 수 있는 유효전력 여유를 해석하는 경우 유효전력 여유해석이라고 한다.

2.1.2 무효전력여유(VQ analysis)

무효전력 여유 해석을 통해서 계통의 무효전력 측면에서의 전압안정성을 검토할 수 있고 전압붕괴의 가능성이 있는 취약한 지역을 파악하여 적절한 대책방안을 적용할 수 있는 위치를 선정할 수 있다.

2.2 전압안정도를 고려한 FACTS 투입방안

전압안정도를 고려한 FACTS 투입방안은 그림 1과 같이 나타난다. 가혹한 상정사고를 선정하기 위해서 전압안정도 기준이 수립되어야 하지만 우리나라에서는 전압안정도 기준이 수립되어 있지 않다. 미국 WECC의 경우 전압안정도 기준은 표 1과 같다. 전압안정도 평가시 가장 먼저 수행되어야 하는 것은 유효전력 여유 해석을 통하여 전압안정도 한계에 심각한 영향을 미치는 사고들을 선택하는 것이다. 전압안정도 유효전력 여유 기준을 만족하지 않는 사고를 가혹한 상정사고로 결정하고, 각 심각한 상정사고에 대하여 전압안정도 측면에서의 취약위치를 선정한다. 취약위치를 선정하는 방법으로는 아래와 같이 여러 가지방법이 있다.

표 1. WECC 전압안정도 기준

수준	계통외란	유효전력여유	무효전력여유
A	단일상정사고	5%이상	5%부하증가시 무효전력여유 확보
B	모선사고	2.5%이상	A수준의 50%확보
C	이중상정사고	2.5%이상	A수준의 50%확보
D	변전소, 발전소	0%이상	0 이상

- VQ 해석 : 각 모선별 무효전력 여유 검토 후, 기준보다 적은 무효전력 여유를 갖는 모선을 취약 모선으로 선정하는 방법
- VQVI : 상정사고 전의 무효전력 여유와 상정사고 후의 무효전력 여유의 변화율을 바탕으로 취약지역을 선정하는 방법[3]

- 접선벡터(Tangent vector)에 의한 모선감도를 구하여 부하변화에 대한 전압 감도(dV/dP_{TOTAL})가 큰 모선을 취약 모선으로 선정하는 방법
- Modal Analysis를 통해 구한 참여인수 값이 큰 모선을 취약모선으로 선정하는 방법

취약 모선이 선정되면 그 지역의 전압안정성 향상을 위한 대책 방안이 수행되어야 한다. IEEE의 전압안정도 평가 보고서[4]에 따르면, 종래의 계통 전압안정도 해석법은 전압수준 유지를 기반으로 하고 있으나, 계통의 전압수준이 유지된다고 하더라도 그 계통 상태가 전압불안정에 가까운 운전점이 될 수 있으며, 좀 더 일반화된 절차가 요구되어야 한다고 언급하고 있다.

본 논문에서는 전압안정성 향상을 위한 대책방안으로 FACTS를 투입하였고 이를 통하여 선정된 전압안정도 평가 기준을 만족하도록 하였다.

3. 사례연구

본 논문에서는 2010년 한전 하계 peak 계통에 대하여 모의하였다. 한전계통은 전 부하의 40% 이상이 수도권 지역에 집중되어 있고 발전기는 남부지역 해안가에 집중되어 있다. 765kV 선로 2개를 포함하여 총 6개의 복상선로가 있고 이를 통해 유효전력이 남부발전 지역에서 수도권지역으로 전송된다. 6개 복상 선로 및 수도권 환상망 선로에서 사고 발생시 수도권 지역에서의 무효전력 부족으로 인한 전압 불안정성 문제가 대두될 수 있다. 주요 모의환경은 아래와 같다. 우리나라에서는 전압안정도 기준이 없기 때문에 표 1의 WECC 전압안정도 기준을 참조하여 계통 모델링 및 데이터의 불확실성을 고려한 사고후 2.5% 이상의 유효전력 마진을 확보하는 것을 기준으로 선정하였다.

- 전압안정도 유효전력 여유 기준 : 2.5%이상
- 상정사고 set : 수도권 지역 345kV route 선로사고와 765kV ckt 사고
- 취약위치 선정 방법 : VQ 해석, VQVI 해석, 전압 감도 해석(dV/dP_{TOTAL})
- 투입 FACTS 기기 : shunt FACTS device (STATCOM, SVC)

상정사고 해석(유효전력 여유계산) 결과 선정된 2%의 마진을 충족시키지 못하는 가혹한 상정사고는 표 2와 같다. 2010년도 한전 첨두부하계통의 basecase loading은 60,316MW이다.

표 2. 선정된 가혹한 상정사고

상정사고	PV여유(MW)	% 여유
신인천-신파주	28	0.046
신안성-신서산	388	0.64
신가평-신태백	400	0.66
영서-서서울	514	0.84
서서울-신온양	524	0.86
화성-아산	749	1.23
광주-신중주	1011	1.65
신인천-신시흥	1114	1.81
신가평-미금	1180	1.92

본 논문에서는 FACTS 투입위치를 선정하기 위하여 앞서 설명된 4가지 방법 중에서 Modal Analysis를 제외한 3가지 방법(VQ 해석, VQVI해석, 부하변화에 대한 전압감도해석)을 사용하였다. 표 2의 9개 상정사고 set에 대하여 취약 위치를 선정할 결과 주로 미금, 동서울, 신원인 지역이 도출되었고, 특별히 가장 가혹한 상정사고인 신인천-신파주 사고의 경우 양주, 신파주, 미금, 동서울 등이 취약 지역으로 도출되었다.(표 3, 4)

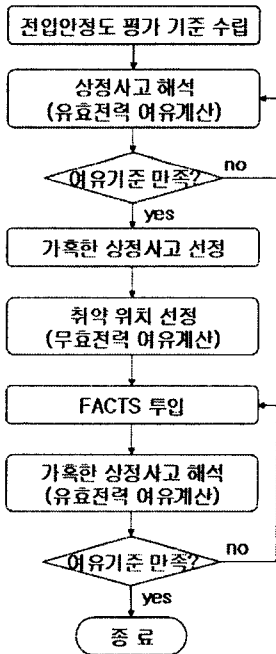


그림 1. 전압안정도를 고려한 FACTS 투입방안

표 3. 신인천-신파주 사고시 취약 위치 검토결과

순위	VQ 해석		VQVI 해석		dV/dP _{TOTAL} 해석	
	모선명	MVar	모선명	VQVI	모선명	dV/dP _{TOTAL}
1	양주	3.0679	신파주	0.002275	양주	0.00044
2	신파주	3.2648	양주	0.002541	신파주	0.00042
3	미금	3.5495	미금	0.003556	미금	0.00042
4	동서울	3.9883	동서울	0.003966	동서울	0.00039
5	신용인	9.5191	신가평	0.008824	신용인	0.00035
6	신성남	10.6672	신용인	0.008986	신가평	0.00033
7	신가평	10.6768	신성남	0.009038	신성남	0.00032
8	신안성	12.8125	신안성	0.009555	신안성	0.00028
9	화성	34.79	화성	0.018746	화성	0.00011
10	신시흥	48.6634	신시흥	0.02273	신시흥	0.00008

표 4. 신안성-신서산 사고시 취약 위치 검토결과

순위	VQ 해석		VQVI 해석		dV/dP _{TOTAL} 해석	
	모선명	MVar	모선명	VQVI	모선명	dV/dP _{TOTAL}
1	미금	206.802	신안성	0.19506	미금	0.000096
2	동서울	215.6387	미금	0.207189	동서울	0.000095
3	신용인	221.1653	신용인	0.208779	신용인	0.000094
4	신성남	252.3165	신가평	0.210926	신성남	0.000085
5	신가평	255.2157	신성남	0.213769	신가평	0.000080
6	신안성	261.5507	동서울	0.214425	신안성	0.000079
7	양주	282.2717	양주	0.233823	양주	0.000076
8	신파주	356.8951	신파주	0.248667	신파주	0.000061
9	화성	524.9991	화성	0.282886	화성	0.000047
10	신시흥	652.715	신시흥	0.304877	신시흥	0.000037

일반적으로 VQVI 지수는 사고전과 사고후 무효전력변화량을 측정함으로써 상정사고에 대한 심각성을 판단하는 지표이다. 표 4를 보면 신안성 모선의 VQVI지수가 가장 낮게 나온 이유는 실제 신안성 선로에서 사고가 발생하였기 때문이다. 주요 북상선로 중의 하나인 765kV 1ckt 사고가 발생하여 나머지 다른 765kV 선로에 조류량이 증가하여 신가평의 무효전력 손실이 크게 증가하였음을 알 수 있다.

전압 불안정 현상은 일반적으로 부하단의 무효전력 수급 약화로 기인한다는 점에서 위에서 선정된 위치에 전압 불안정성을 제거하기 위하여 shunt FACTS 기기 투입을 고려하였다. FACTS 투입 후보지로 미금, 동서울, 신용인, 양주를 고려하였다. 또한 2.5%의 마진을 충족시키기 위해 각 모선에 투입해야할 FACTS 투입량은 표 5와 같다. PV 및 VQ 해석은 정태적인 해석방법이므로 shunt FACTS 기기는 유효전력 출력이 0인 발전기(무효전력만 출력 가능)로 모델링할 수 있다.

표 5. 2.5% 마진확보 위한 FACTS투입 위치 및 용량

상정사고	FACTS 투입위치	FACTS 투입용량
신인천-신파주	미금	738MVar
	양주	744MVar
	동서울	790MVar
	신용인	882MVar
신안성-신서산	동서울	774MVar
	미금	780MVar
	신용인	781MVar
	양주	1051MVar

신인천-신파주 상정사고시 양주, 미금, 동서울에 투입하는 경우가 가장 효과가 좋고, 신안성-신서산 상정사고시 동서울, 미금, 신용인에 투입하는 경우가 효과가 좋다. (표 5) 신인천-신파주 사고시 수도권 지역의 주요 무효전력원인 신인천 발전소에서 직접적으로 무효전력을 공급할 수 없기 때문에 양주에 바로 FACTS를 투입하거나 북상선로를 통해 수도권에 전력이 유입되는 주요 모선인

미금, 동서울, 신용인에 FACTS를 투입하는 것이 효과적이라 할 수 있다. 신안성-신서산 사고시 수도권 중부로 유입되는 조류량이 감소하게 되므로 인근 지역인 신용인에 직접 FACTS를 투입하거나 수도권 동쪽지역으로 유입되는 조류량이 증가할 수 있도록 동서울이나, 미금에 FACTS를 투입하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

표 6, 7에는 각각 STATCOM 100MVar, 200MVar 투입시 가혹한 상정사고별 FACTS 투입 위치에 따른 PV margin이 나와 있다. 상대적으로 투입 효과가 좋은 부분에 음영을 넣었고, 투입효과가 좋은 부분은 위에서 VQ 해석이나 dV/dP_{TOTAL} 해석을 통하여 얻은 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 또한 표 6, 7의 결과를 살펴보면 대략적으로 100MVar 투입할때마다 증가하는 PV 마진이 거의 비슷하다는 사실을 알 수 있었고 이를 바탕으로 2.5% 마진 확보를 위해 투입하는 FACTS용량을 대략적으로 추정할 수 있었다.

표 6. FACTS 100MVar 투입시 PV 마진(%)

FACTS 투입위치	FACTS 투입용량	미금	양주	동서울	신가평	화성	신안성	신성남	신용인	신시흥
양주-서시흥	0.04	1.11	1.05	1.11	1.07	0.95	1.05	0.93	1.10	1.07
신안성-신서산	0.04	0.91	0.95	0.92	0.87	0.75	0.87	0.73	0.90	0.88
서시흥-신안성	0.08	1.12	1.05	1.12	1.08	0.99	1.05	0.95	1.11	1.09
신가평-신파주	0.08	0.93	0.96	0.93	1.07	0.77	0.87	0.75	0.91	0.89
화성-기전	1.23	1.45	1.41	1.49	1.45	1.37	1.41	1.34	1.48	1.45
동주-신양주	1.85	1.92	1.85	1.92	1.88	1.75	1.85	1.74	1.91	1.88
신안성-신성남	1.81	2.05	2.01	2.07	2.02	1.92	2.01	1.91	2.06	2.04
신성남-미금	1.82	2.21	2.11	2.20	2.13	2.03	2.11	1.99	2.19	2.14

표 7. FACTS 200MVar 투입시 PV 마진(%)

FACTS 투입위치	FACTS 투입용량	미금	양주	동서울	신가평	화성	신안성	신성남	신용인	신시흥
양주-서시흥	0.04	1.30	1.24	1.30	1.27	1.05	1.25	1.00	1.35	1.29
신안성-신서산	0.04	1.10	1.05	1.10	1.11	0.85	1.11	0.82	1.17	1.11
서시흥-신안성	0.08	1.35	1.28	1.35	1.29	1.12	1.28	1.05	1.34	1.30
신가평-신파주	0.08	1.10	1.05	1.10	1.12	0.87	1.07	0.82	1.17	1.11
화성-기전	1.23	1.72	1.62	1.71	1.67	1.50	1.62	1.42	1.70	1.65
동주-신양주	1.85	2.19	2.05	2.19	2.10	1.85	2.05	1.83	2.18	2.11
신안성-신성남	1.81	2.30	2.17	2.30	2.23	2.03	2.23	2.03	2.29	2.25
신성남-미금	1.82	2.47	2.31	2.46	2.33	2.13	2.32	2.10	2.43	2.37

4. 결 론

전압안정도를 향상시키기 위하여 FACTS를 투입하는 방안이 대하여 알아보았다. 전력계통의 특성상 계통이 거대하고 non-linear하기 때문에 FACTS 투입방안을 systematic한 방법으로 도출하기에는 어려움이 많았다. 본 논문은 안정도와 경제성을 고려하지 않고 안정도 측면 위주로 연구했지만 실질적인 FACTS 투입을 위해 고려되어야 하는 경제성에 대한 연구가 추후 진행되어야 할 것이다. 또한 이 논문에서는 전압안정도 평가 기준을 WECC 기준을 바탕으로 판단하였지만 경제성과 안정도를 고려한 우리 계통의 특성에 맞는 전압안정도 평가 기준이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, "대용량 전력수송 기술개발", 2004. 11
- [2] T. Van Cutsem, "Voltage stability of electric power system", Kluwer Academic Publishers
- [3] 조윤현, "A method for voltage stability assessment of power system using variation rate of reactive power margin with respect to contingency", 2003. 12
- [4] "Voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology," WSCC Final Report, May 1998
- [5] T. Van Cutsem, "A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse", IEEE Trans, Power Systems, vol. 6, no. 1, Feb. 1991, pp. 145-156