

새로운 부하차단모델 적용 및 전망

강대인 | 한국전력공사 중앙교육원 송변전교육팀 교수

1. 부하차단 개요

전력계통에 외란(발전기 고장, 송전선로 고장 등)이 발생하여 일부 발전력의 탈락 등으로 전력계통에서 발전력과 부하량의 평형이 깨어지면 계통 주파수가 저하되어 계통에 접속하여 운전 중인 Steam Turbine Generator의 Turbine Blade가 손상을 받게 되며 심한 경우에는 전 계통이 정전될 수도 있다.

이와 같은 문제점을 방지하기 위하여 저주파수계전기(UFR) 등에 의하여 주파수 저하의 정도에 따라 적정량의 계통 부하를 차단시킴으로써 발전량과 부하량이 평형을 이루어 계통 주파수가 회복하도록 하는 것을 부하차단이라고 한다.

부하차단방식 일반

□ 저주파수 부하차단 방식

(UFLS : Under Frequency Load Shedding)

가장 일반적인 부하차단방식은 저주파수 부하차단 방식(UFLS : Under frequency Load Shedding)이다. 이 방식은 전기사업자가 전체 계통 붕괴의 위험도를 최소화하고, 전체 네트워크의 신뢰

도를 최대화시키면서 계통 설비를 보호하기 위해서 사용한다.

발전력 상실 혹은 전력을 수송하는 송전선로에 고장이 발생할 경우, 발전력에 의해 안전하게 전력이 공급될 수 있는 수준으로 계통에 연결된 부하를 줄이는 데에 이용된다. 부하차단은 주파수가 허용 최소 주파수 아래로 떨어지거나 혹은 주파수 변화 비율이 미리 지정된 값을 초과할 때 부하를 차단하도록 설계된 저주파수계전기에 의해서 시작한다. 부하차단은 과도한 부하차단을 막고 주파수가 회복될 수 있도록 일반적으로 여러 단계에 걸쳐 수행된다.

□ 저전압 부하차단 방식

(UVLS : Under voltage Load Shedding)

저전압 부하차단방식은 저주파수 부하차단 방식과 유사하며, 저비용으로 계통 붕괴를 막아주는 수단이다. 이 방식은 전압 수준을 모니터링하기 위해 저전압계전기 (under voltage relay)를 이용한다. 일반적으로 미리 정해놓은 허용전압 이하로 수초 이상 전압이 내려가면 저전압 계전기가 작동하여 부하선로의 차단기를 동작시켜서 부하 일부를 차단한다. 이런 부하차단을 시행하면 전압은 허용 전압으로 회



복될 수 있다. 과도한 부하 차단을 피하기 위해 단계 별로 부하차단을 시행하며 적절한 부하차단 시간 간격의 선택은 부하차단의 효과를 높이는 중요한 요소가 된다.

□ 원격 부하차단 (Remote Load Shedding)

원격 부하차단은 공급 우선순위가 낮은 공업용, 상업용 또는 주거용 부하를 직접적으로 차단하는 것이다. 원격 부하차단은 저주파수 부하차단을 수행하는데 사용되는 동일한 부하차단 계전기를 사용한다. 이 계전기는 두 가지 기능을 수행하는데, 원격 부하차단 명령을 직접 수행하는 기능과 국부 지역 주파수 조건에 따라 부하차단을 수행하는 기능을 하고 있다.

□ 계통 분리

(Controlled opening of inter-connection)

계통 분리는 발전력 상실을 수반하는 주요 외란이나 지역간 계통불안정을 유발하는 고장이 발생할 경우 전체 전력계통을 구하기 위한 최후의 수단이다. 상호 연결된 한 계통이 불안정하게 되면 전체 계통에서 그 불안정한 계통을 분리함으로써 전체 계통이 붕괴되는 것을 막는 개념이다. 주로 국가간, 주(州)간의 연계된 전력계통에 적용된다.

우리나라 전력계통의 부하차단

전력수요의 급진적인 성장은 도심지역을 중심으로 집중화 경향을 띄고 있으며 전원입지의 부족과 남비현상으로 인해 필연적으로 기존의 발전소 입지를 최대한 이용하여 발전소를 건설할 수밖에 없으며, 이로 인하여 발전단지의 대용량화와 대규모 전력전송설비의 건설을 초래하고 있다.

전원설비는 주로 남쪽에 집중되어 있고, 수도권에는 부하가 집중되어 있어서 수도권의 부하밀집을 해결하기 위해 장거리 대전력 수송을 담당하는 765kV 계통을 건설하여 운영하고 있는데 이 765kV 계통에 고장이 발생하면 전원설비가 별로 없어서 남부지역의 발전력으로 전력을 충당하는 수도권에는 주파수 저하 및 저전압이 발생하여 대규모 정전사태가 발생하게 되므로 이를 해소하기 위해 부하차단을 시행한다.

현재 우리나라 전력계통에 적용하고 있는 부하차단은 두 가지 방식이다. 한 가지는 전통적으로 적용해온 UFLS 방식으로써 발전력의 일부 상실이나 송전선로의 고장 등으로 발생하는 발전력과 부하의 불평형으로 계통 주파수가 설정치 이하로 저하되면 전체 계통의 안정도를 위하여 미리 정해놓은 순서에 따라 단계적으로 부하를 차단함으로써 발전력과 부하의 평형을 이루고 주파수를 회복시키는 방식이고, 또 다른 한가지는 최근에 새롭게 도입된 것으로 수도권에 대규모 전력을 수송하는 765kV 송전선로 고장 시 수도권에 저전압이 발생하게 되면 수도권의 일부 부하를 UFLS 방식으로 차단하는 방식이다. 이것을 수도권 고장방지시스템이라 부르고 있다.

2. 수도권 고장파급방지시스템 개요

765kV 송전선로에 고장이 발생할 때 수도권지역에 발생하는 전압불안정 현상을 방지하고 용통전력을 증대하기 위해 수도권의 345kV 변전소 2개소의 모선전압을 모니터링하여 저전압 발생 유무를 판단하고, 만일 저전압이 발생하게 되면 수도권 154kV 변전소에서 공급하는 약 600MW의 부하를 차단하여 수도권 전압불안정을 해소하도록 구성된 시스템이다.

그림 1 _ 변전소 부하차단 구성도

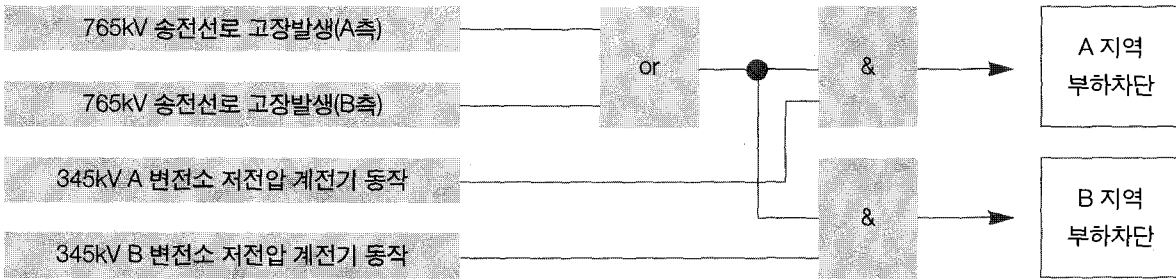
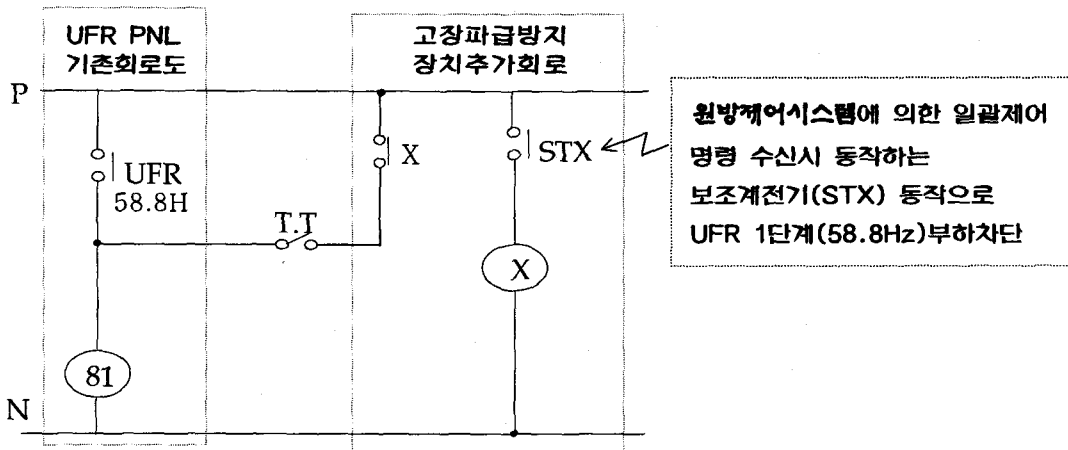


그림 2 _ 변전소 UFR반 배전선로 차단회로 구성도



이 시스템은 발전력과 부하량의 불평형으로 전력 계통의 주파수가 변동할 때 주파수를 회복시키기 위하여 이미 구성된 시스템(UFR)을 그대로 이용하여 수도권의 부하를 차단하도록 회로만 보강한 것이다.

3. 수도권 부하차단량 전망

수도권 최대부하는 2005년도에 22,645 MW, 2010년도에 25,991 MW, 2015년에 28,515 MW, 2017년도에 29,388MW로 장기 전망하고 있다. 이는 전체 부하의 42% 정도를 차지하는 것으로써 수

도권 부하가 전체 부하에서 차지하는 점유율에는 년도별로 큰 차이가 없다.

이러한 수도권의 부하 증가는 남쪽에서 수도권의 부하 공급을 위해 전력을 수송하는 대규모 송전선로의 고장 발생시 수도권에 발생하는 저전압을 해소하기 위해 차단해야 하는 부하차단량의 증가로 이어진다.

년도별로 최소 부하 차단량을 계산해본 결과 2005년도는 약 600-800 MW, 2006년도는 약 880 MW, 2007년도에는 약 1,500 MW, 2010년도에는



약 2,000 MW로 매년 큰 폭으로 증가하고 있다.

이러한 수치가 의미하는 바는 수도권 전력계통 붕괴를 막기 위해 2005년도는 수도권 부하의 약 3%를, 2010년도는 7.7%를 강제로 차단하는 것으로써 국민들에게 많은 불편을 끼치는 것은 물론 산업현장의 정전으로 인한 손실이 심히 막대하다는 것을 의미한다.

4. 새로운 부하차단시스템 도입의 필요성

현재 운영중인 수도권 고장파급방지시스템은 765kV 송전선로 고장 발생시 수도권 일부 345kV 변전소 모선의 저전압계전기 동작을 논리적으로 판단하여 미리 선정된 수도권 154kV 변전소에서 공급하는 부하를 차단하여 수도권 저전압을 해소하고 계통의 붕괴를 막는 개념이다. 그러나 이 시스템은 부하를 실제적으로 차단하는 154kV 변전소 모선 전압의 양, 불량 여부와 관계없이 부하를 차단하고 있어서 저전압 해소를 위한 부하차단의 실효성에 의문을 갖게 한다.

저전압을 해소하기 위해 가장 좋은 부하차단 방법

은 저전압이 가장 많이 발생한 변전소 모선에 연결된 부하를 차단하는 것이다. 그러나 현 고장파급방지장치는 그렇지 않기 때문에 향후에는 직접 부하 차단을 시행하는 변전소의 모선전압의 민감도에 따라 부하차단을 시행함으로써 부하 차단량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 방향으로 부하차단 모형을 연구해야 할 것이다.

여기에 대한 대안으로 각국에서 시행하고 있는 저전압부하차단시스템(UVLS)을 생각해 볼 수 있다. 이미 전술한 바와 같이 UVLS 방식은 미리 정해놓은 허용전압 이하로 수초 이상 전압이 내려가면 저전압 계전기가 작동하고, 부하선로의 차단기를 동작시켜서 부하 일부를 차단하는 시스템이다. 과도한 부하 차단을 피하기 위해 단계별로 부하차단을 시행하며 적절한 부하차단 시간 간격을 선택하면 부하차단량을 많이 줄일 수 있다.

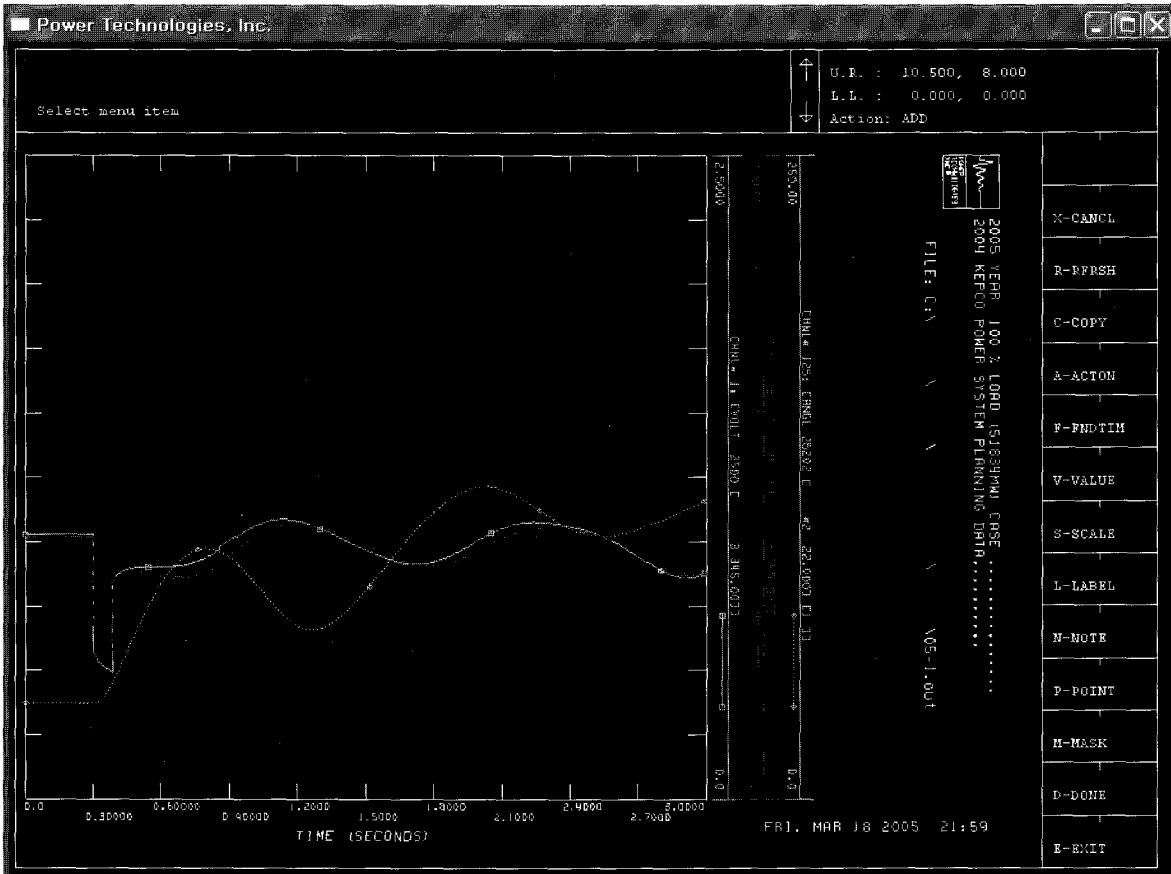
5. UVLS 모델을 이용한 수도권 부하 차단량 산정 결과

UVLS 모델을 적용하여 년도별로 Simulation한 결과 2005년부터 2007년까지 현행 수도권 고장파

표 1 _ 국내 전력선통신 현황

년 도 별		2005년	2006년	2007년	2010년
765kV A측 고장시	현행 방식	600	860	1,500	2,000
부하차단량[MW]	UVLS 적용	240	540	1,200	1,000
감소량(현행 방식 - UVLS)		-360	-320	-300	-1,000
765kV B측 고장시	현행 방식	800	880	500	1,000
부하차단량[MW]	UVLS 적용	380	430	-45	
감소량(현행 방식 - UVLS)		-420	-450	-500	-955

그림 3 _ UVLS 모델을 이용한 Simulation 결과 화면



급방지시스템을 적용했을 때보다 약 330-460MW의 부하 차단량이 감소했으며, 2010년 계통에서는 약 950-1,000MW의 부하 차단량이 감소했음을 알 수 있다.

전력계통의 Simulation은 미국 PTI사에서 개발하여 세계적으로 널리 사용되고 있는 계통해석 프로그램인 PSS/E(Power System Simulator For Engineering Tool)를 사용하였고, 기존의 수도권 고장파급방지시스템에 의한 수도권 부하차단용량은 조류계산에 의한 정적모드로 해석하였고, UVLS 모델 적용은 동적모드에서 해석하였다.

저전압이 발생한 154kV 변전소 부하를 차단했을 때 모선 전압이 회복되는 모습을 보여주고 있다.

6. 해외 전력회사의 UVLS에 대한 설문조사 결과

- AEP(Arizona Electric Power Co.)
- APS(Arizona Public Service Co.)
- NCE(New Century Energy)
- NCPA(Northern California Power)



Agency)

- PAC(Pacific Corp)
- PEGT(Plains Elec. Gen. & Trans. Coop. Inc)
- PG&E(Pacific Gas & Electric Company)
- PNM(Public Service Co. of NM)
- PRPA(Platte River Power Authority)
- PSE(Puget Sound Energy)
- SCE(Southern California Edison)
- SMUD(Sacramento Municipal Utility District)
- SVSG(Sacramento Valley Study Group)
- TEP(Tucson Electric Power Company)
- USBR(U.S. Bureau of Reclamation)
- PUD(Grant County Public Utility District)

□ UVLS를 채용하고 있는가?

- NCPA : 한곳(the City of Roseville)에서 채용하고 있다.
- PRPA : 전체 부하의 50%를 차지하고 있는 한 곳은 1초 동안 전압이 90% 이하로 내려가면 전체 부하를 차단하게 하고 있다.
- PSE : 설치되는 되어 있지만 거의 동작하는 경우가 없어서 제대로 동작하는지 알기 어렵다.
- Seattle City Light : 설치되어있다.
- SCE : 설치되어 있지 않다. 하지만 몇몇 선로의 동시 사고 시에는 저전압을 체크하지 않고도 바로 부하 차단을 실시하도록 되어 있다. 부하 차단 시의 시작과 그 양은 선로 사고와 그 선로에 흐르던 조류량으로 결정된다.
- TEP : 설치되어 있지 않다. Tie-Open-Load-Shed(TOLS)가 설치되어 있다. Tucson 지역

의 네 개의 tie line중에서 하나 이상이 사고 나면 전압 불안정이 발생할 수 있으므로 이에 대한 대비로 TOLS가 설치되었다.

- USBR : 설치되어 있지 않다.

□ 새로 설치할 계획이 있는가?

- NCPA : City of Lodi 외에는 계획없다.
- PEGT : 현재 검토 중
- SCE : 필요성과 효과에 대해 검토 계획

□ 부하차단량은 어떻게 결정하였는가?

- APS : 아직 토론 중
- Grant County PUD#2 : 조류계산 검토 결과
- PG&E : PV 곡선의 의거
- PAC : Willamette Valley/Southern Washington(WILSWA) 지역에 대해 Northwest Power Pool 연구 결과
- PRPA : 모든 부하 차단 가능. '전력품질' 관점에서 보면, 저전압은 잠재적으로 발전자와 부하 모두 피해를 유발시킬 수 있다. 최소 전압 이하로 내려가면 모든 부하를 차단하고 수동으로 다시 복구시키도록 한다.
- PNM : WSCC 기준을 만족하도록 하고 지역적 계통 분리를 막는다.
- Seattle City Light : Puget Sound Voltage Stability Work Group의 연구에 따른다.
- SMUD : SVSG의 PV, QV 곡선을 이용한 연구 결과에 따른다. 최악의 두 개의 상정 사고 하에서도 최소 전압을 유지하며 무효전력 여유도를 만족시킬 수 있는 양.
- TEP : EHV 사고에 대한 모의. 0.98p.u. 이상이 되도록 부하를 차단한다.

□ 모든 부하는 동시에 차단되는가?

그렇지 않다면, 몇 단계에 걸쳐서? 매 단계마다 얼마만큼의 부하를? 다음 단계까지 어느 정도의 시간이 주어지는가? 단계의 수효와 각각의 부하 차단량은 어떻게 결정하였는가?

- APS : 3단계를 사용할 것이다. 각 단계마다 결정된 부하차단량은 없다. 단계의 수효는 기술자들의 판단에 의한 것이다.
- Grant County PUD#2 : 각각 18MW, 20MW, 7MW이다. 경제적으로 최소의 피해가 가도록 결정하였다. 단계의 수효의 결정은 0.95p.u. 이상으로 복구될 수 있는 만큼 하면 되니까 간단하다.
- NCPA : 1단계만 - 여러 단계에 대한 기준이나 연구된 바가 없다.
- PG&E : 가능한 모든 부하를 차단한다.
- PAC : 3단계 걸친다. 각 단계마다 필요한 양의 대략 1/3 정도를 차단한다.
- PRPA : 가능한 모든 부하를 차단한다. '전력 품질' 관점에서 보면, 저전압은 잠재적으로 발전자와 부하 모두 피해를 유발시킬 수 있다. 최소 전압 이하로 내려가면 모든 부하를 차단하고 수동으로 다시 복구시키도록 한다. 저전압이 지역적으로 국한되면 문제가 되는 지역 외의 부하를 차단하는 일은 거의 없어진다.
- PNM : PLC 기준에 의해 사고나 부하 정도에 따라 여러 단계가 가능하지만 아직 대부분의 세부 사항은 검토 중이다.
- Seattle City Light : 동시에 모든 부하를 차단하지는 않는다. Northwest Power Pool에서 제시한 기준에 따른다. 1단계: 3.5초 시지연, 전압이 정상치의 90% 이하이면 부하의 5% 차단, 2단계: 5초 시지연, 전압이 정상치의 92% 이하

이면 부하의 5% 차단, 3단계: 8초 시지연, 전압이 정상치의 92% 이하이면 부하의 5% 차단.

- SMUD : 가능한 모든 부하를 동시에 차단한다.
- TEP : 가능한 모든 부하를 동시에 차단한다. 부하, 투입된 발전기, 계통 상황에 따라 차단할 부하량이 달라진다.

□ 다른 부하 차단 기준을 채택하고 있는가? 또는 계획이 있는가?

- APS : 저주파수의 경우는 자동이다. 만일 공급량이 부족하면 수동으로 부하를 차단할 계획이다.
- Grant County PUD#2 : 저주파수.
- NCE : 저주파수 부하 차단
- NCPA : 없다. 예외로 City of Lodi는 서부 계통과 연계될 경우 필요할 것이다.
- PG&E : UFLS(Under Frequency Load Shedding).
- PAC : UFLS
- PEGT : UFLS. 계통 운영자만이 부하를 수동으로 차단할 권한이 있다.
- PRPA : 저주파수의 경우
- PNM : WSCC의 UFLS 프로그램과 동일한 UFLS를 수 년간 사용 중이다. 또한 긴급 상황에서는 운영자가 부하를 차단할 수 있는 완전한 계획이 준비되어 있다.
- Seattle City Light : UFLS, UVLS와 똑같이 설치됨.
- SCE : UFLS 외에 몇 개의 다른 부하 차단 기법이 채용되고 있다. 주로 기기의 사고나 과부하 조건일 때 사용된다.
- SMUD : Air Conditioning Load Management (ACLM)이 사용되고 있다. 긴급 상황에서 이 방법을 사용한다.



- TEP : 없다.

□ UVLS와 다른 부하 차단 기법을 어떻게 협조시키는가?

- APS : 일단은 UFLS의 대상이 된 부하에 대해 부하 차단을 준비한다.
- Grant County PUD#2 : 하나는 전압으로 다른 하나는 주파수로 한다.
- NCE : 근본적으로 다르다.
- NCPA : PG&E's Goldhill 기법과 협조한다. PG&E는 SVSG의 회원이다.
- PG&E : 협조 동작은 없다.
- PAC : 협조 동작이 필요치 않다.
- PRPA : 모든 병렬 무효전력 기기들은 적당한 과전압 기준치를 갖는다. 커패시터가 꺼지면 리액터가 들어온다.
- PNM : UFLS와 UVLS를 협조 동작시킬 계획은 없다.
- Seattle City Light : 협조 동작은 없다.
- SMUD : SMUD의 UVLS는 인근 전력 회사들과 완전히 협조되지는 않는다.
- TEP : 없다.

□ 현재까지 UVLS를 사용하는데 문제점은 없는가?

- Grant County PUD#2 : 현재까지는 없다.
- NCE : 가장 큰 문제는 '문제'를 규정하는 것과 전압 붕괴와 일시적인 저전압 현상을 구별하는 것이다.
- NCPA : 없다.
- PG&E : 현재까지는 없다.
- PAC : 없다.
- PRPA : 현재까지 오동작한 적은 없다.
- PNM : 부하 모델에 따라 큰 과전압 스윙이 발

생할 수 있으며 복구 과정에서 과전압 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있다는 연구 결과가 있었다. 더 나은 부하 모델과 과전압을 제어할 수 있는 수단이 연구 중이다.

- PSE : 안전성과 비용이 항상 관심거리이다.
- Seattle City Light : 없다.
- SMUD : 2년간 운영되었으나 아무 문제도 없었다.

7. 결론

우리나라의 경제발전 및 국민의 생활수준 향상으로 인하여 전력수요는 급진적인 성장을 해 왔다. 전력수요는 주로 수도권과 지역 거점 도시를 중심으로 집중화 경향을 띄고 있다.

그러나 전력설비에 대한 국민의 혐오, 넘비현상 및 수도권 전원입지 부족 등으로 인하여 발전소는 남쪽에, 전력수요의 절반은 수도권에 집중되는 불균형으로 말미암아 남쪽의 전원단지에서 북쪽의 수요단지로의 대규모 전력수송이 불가피하게 되었고 이로 인하여 많은 문제점이 야기되고 있는 실정이다.

대규모 전력을 수도권으로 수송하는 전력설비에 고장이 발생하게 되면 수도권 일부 지역에 유효전력 및 무효전력 불균형에 의한 전압 불안정이 발생하며 조기에 이를 해소하지 못할 경우에 광역정전으로 이어져 사회적으로 많은 손실을 초래할 수 있다.

그동안 대규모 전력전송 설비인 765kV 송전선로의 고장으로 인하여 초래될 수 있는 광역 정전을 사전에 예방하기 위하여 발전력과 부하의 균형을 유지

하는 충분조건으로 일부 발전력의 탈락과 수도권 부하를 차단하는 시스템을 도입하는 고장파급방지시스템을 채택하여 운영하고 있다.

그러나 이 시스템은 수도권 345kV 변전소 저전압 계전기 동작 시 UFR 1단계(58.8Hz) 차단부하로 미리 선정된 154kV 변전소 부하를 해당 부하차단 시행 모션전압의 양, 불량여부와 관계없이 차단하는 불합리함을 내포하고 있기 때문에 UVLS 모델을 이용하여 765kV 송전선로 고장 시 수도권 변전소의 모션전압 민감도에 따른 적절한 부하 차단개소를 선정하고 최소한의 부하 차단용량으로 최대의 계통 안정도를 확보하는 방안을 검토한 결과 현행 고장파급방지시

스템보다 2005년부터 2007년까지는 약 330-460 MW, 2010년 계통에서는 약 950-1,000 MW의 부하 차단량을 감소시킬 수 있음을 확인했다.

그러나 이런 결과는 어디까지나 이론적인 것으로써 실제 전력계통에 적용하기 위해서는 많은 연구가 필요하다. 따라서 향후 UVLS 시스템의 도입과 설치 타당성에 대한 연구용역을 통해 765kV 송전선로 사고 시 수도권의 부하차단 용량을 가장 합리적으로, 최소한으로 제한할 수 있도록 연구용역 등을 시행하여 구체적으로 증명할 필요가 있다고 판단된다.