

# 미국 서부지역의 광역정전

문 영 현 연세대학교 공과대학 교수

## 1. 머리말

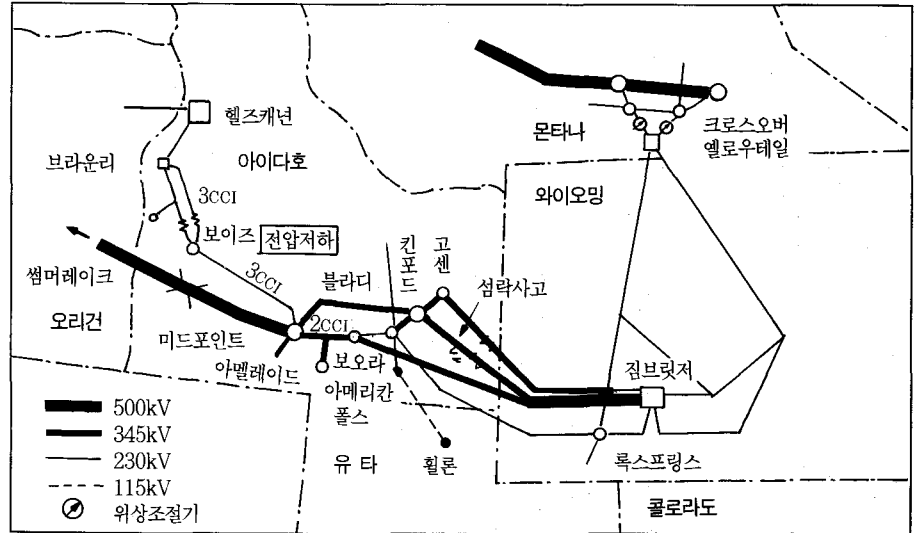
전력계통은 산업계에 에너지를 공급하는 시스템으로서 인체에서의 동맥과 같은 역할을 한다. 전력공급에 이상이 발생한다면 산업에 미치는 영향은 지대하므로 전력사업에 대한 전력공급의무를 법으로 정하여 놓고 있다. 전력사업자는 항상 양질의 전력을 공급하여야 할 의무가 있으며, 근래에는 그 의무규정을 이행하지 못하였을 경우 손해변상까지 규정함으로써 의무규정을 선언적인 규정에서 실질적인 개념으로 강화시키고 있다. 이에 따라 계통운용기술도 크게 발전되어 공급신뢰도 향상을 피부로 느낄 수 있게 되었다.

전력계통은 지역간 연계를 통하여 방대한 시스템을 구성하고 있다. 이러한 계통특성으로 대규모 정전사고를 완전히 없앨 수는 없다. 실제로 60년대 중반, 후반에 미국, Canada 등지에서 수개 주 또는 10개 주 이상의 대규모 정전사고가 여러 차례 발생한 바 있으며 이러한 사고와 더불어 계통운전기술이 발달했다고 볼 수도 있다. 계통신뢰도 확보를 위하여 70년대에 SCADA, 80년대에 EMS 등의 On-line컴퓨터

제어기법을 도입하였고 이에 따라 대규모 정전사고는 현격히 줄어들었다. 그러나 80년대에 접어들면서 냉방용 부하증가와 더불어 급격한 부하변동에 따른 전압안정도 문제가 제기되었고, 이에 따라 80년대 후반부터 대규모 정전사고가 다시 고개를 들고 있다. 최근의 대규모 정전사고로는 '89년 동경 전압붕괴사고, '94년 12월 미서부 WSCC 광역정전사고 등을 들 수 있으며, 급기야는 지난해 7월 2일과 8월 10일 등 2차에 걸쳐서 미국 서부 WSCC관할 미국, 캐나다, 멕시코의 15개 주에 걸치는 광역정전사고가 발생하였다.

7월 2일에는 Idaho 부근 345kV선로에 사고가 발생하였는데 전압붕괴와 계통동요에 의하여 사고가 WSCC(Western Systems Coordinating Council) 관할지역 전역에 파급됨으로써 약 200만호에 영향을 준 광역정전이 발생했다. 7월 3일 같은 시각에 똑같은 유형의 사고가 재발했으나 부하차단으로 사고파급을 막아 광역정전을 피할 수 있었다. 이 사고는 '94년 12월 WSCC광역정전사고와 유사한 사고로서 비상한 관심을 끌었으며 미국 대통령까지도 사고 조사보고를 지시하는 등 특별한 관심을 보였다. 그러나 8월 10일에 또 다시

Oregon Portland 부근 500kV선로에 발생한 사고가 광역정전으로 확대되어 400만호에 영향을 끼친 광역정전이 발생하였다. 이 사고는 8월 2일 대통령에게 보고를 마친 뒤 1주일만에 재차 일어난 사고로 미국사회에 큰 충격을 안겨 주었다. 본고에서는 사고경위, 당시의 계통운전 상황과 사고원인을 분석하여 소개함으로써 대규모 정전사고에 대한 경각심을 일깨우고자 한다.



<그림 1> 최초 사고가 발생한 아이다호~와이오밍의 계통도(1995년 7월 2일)

## 2. 사고개요

미국 서부지역 광역 정전사고는 WSCC관할하의 15개 주에서 대규모정전사고가 발생한 것으로서 최초의 사고는 아이다호주 Kinport 부근에서 '96년 7월 2일 오후 1시 25분에 발생하여 대규모 정전사고로 확대되었다. 바로 다음날 거의 같은 시각에 또 다시 같은 유형의 사고가 재발하였으나 전날과 같은 과정을 밟자 초기에 부하차단을 실시함으로써 사고 파급을 막을 수 있었다. 또한 8월 10일에는 지역을 달리하여 오리건주 Portland부근에서 발생한 선로사고가 파급되어 계통동요와 더불어 대규모 광역사고로 확대되었다. 이러한 사고들은 하절기 중부하에서 발생한 사고로 많은 유사점을 안고 있다. 사건개요는 Internet을 통해서 공개되고 있으며 요약하면 다음과 같다.

### 가. Idaho 345kV 선로사고

**제1차 사고** ('96년 7월 2일 1:25 PDT 발생)

#### (1) 사고원인

기록적인 무더위(32.2~42.2℃)로 인하여 냉방부하가 급격히 증가하였고 이러한 중부하 상태에서 와이오밍주 Jim Bridger 발전소와 아이다호주 동남부의 Kinport간을 잇는 주요 간선인 345kV 송전선에 수목접촉에 의한 지락사고가 발생하여 사고가 인근 선로에 연쇄적으로 파급되었다.

#### (2) 초기사고

① Jim Bridger와 Kinport간의 345kV 송전선이 수목접촉사고로 인하여 차단되는 것과 거의 동시에 Jim Bridger 발전소와 Goshen변전소간의 345kV 선로가 차단됨(차단 이유가 명확히 밝혀지지 않음: 그림 1 참조).

② 2개 선로차단이 Jim Bridger 발전소 보호프로그램1)을 작동시켜 곧바로 4기의 발전기 중 2기를 정

1) 7월 3일 반복되는 사고에서는 'remedial scheme' 이라고 밝혔으며 필자의 견해로는 발전기 탈조방지를 위한 출력제한 장치(또는 알고리즘)로 생각됨.

**정책 방향**

지시킴(발전 손실량 520MW×2).

③ 27초 후 Boise지역의 전압이 크게 떨어져 Boise-Hells Canyon(발전소)간의 4개 송전선이 차단됨.

**(3) 사고파급**

오리건 남부의 전압도 급속히 강하되었고 전압붕괴로 인하여 광역정전으로 파급되었는데 파급경위는 다음과 같다(그림 2 참조).

① Oregon남부 전압 붕괴로 인하여 500kV 송전선인 Grizzly-Summer Lake, Malin-Summer Lake, Midpoint-Summer Lake선이 릴레이 차단됨.

② Malin변전소의 500kV 북측 모선에서 Relay 동작. 이때 500kV Shunt Capacitor가 전압을 유지하려고 투입되었으나 바로 뒤에 고장을 일으킴.

③ 500kV Grizzly-Malin이 릴레이 차단됨.

④ 500kV Malin-Round Mountain 1, 2호선이 Malin 변전소측에서 릴레이 차단됨.

⑤ Captain Jack 변전소 500kV 차단기에서 고장이 발생하였고 이때문에 Captain Jack-Malin 2호선과 Captain Jack-Olinda선이 릴레이 차단됨.

⑥ 이에 따른 전력 충격이 Idaho, Utah, Colorado, Wyoming을 따라 파급되면서 Idaho남부, Utah 및 Utah와 Colorado의 남부경계에 이르는 정전을 유발하였고 계통은 5개 지역으로 분리되었음.

**(4) 사고규모**

WSCC에 공급하고 있는 17개 주 중 15개 주에서 공급지장이 발생하였다.

· 공급지장 수용가수 : 150만~

200만 Customer로 추정됨.

**(5) 사고복구**

- 주요고객 : 30분 이내 전력공급 재개
- 완전복구시간 : 8시간 20분

**제2차 사고**

(96년 7월 31일 4:03 MAST(13:03 PDT))

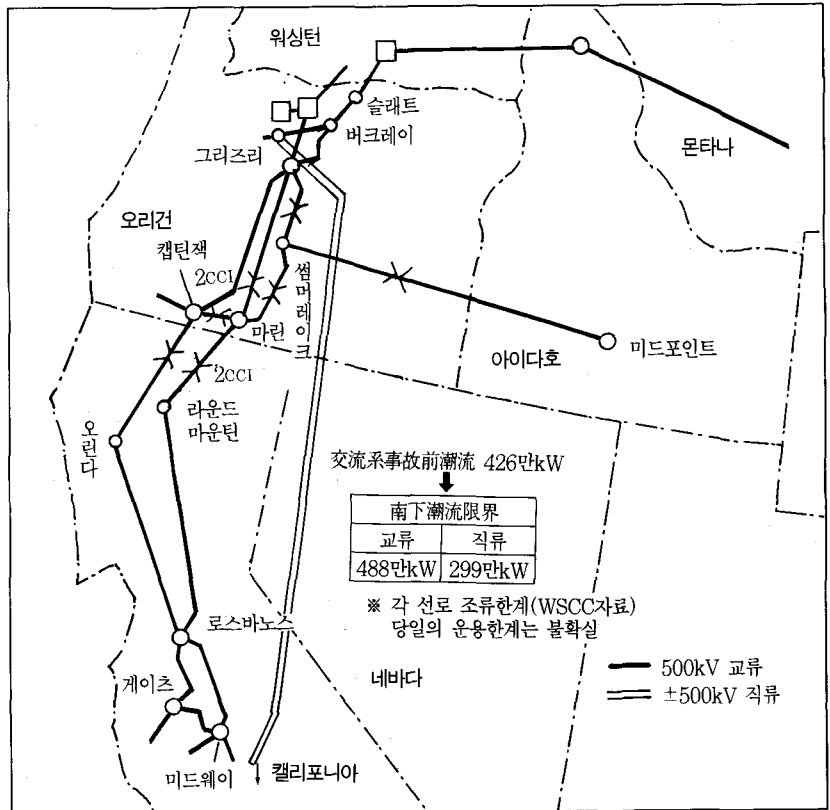
**(1) 사고발생**

7월 2일 경험한 사고와 같은 일련의 사고가 같은 시간에 반복되기 시작하였다.

Jim Bridger-Kinport간의 345kV선로가 수목접촉 사고 발생에 따라 차단됨.

**(2) 사고파급**

① Jim Bridger-Kinport간 선로 차단에 이어 곧바로



<그림 2> 오리건~캘리포니아간의 계통연계선 차단상황(1996년 7월 2일)

Jim Bridger-Goshen간의 345kV선로가 차단됨(차단원인이 여전히 명확치 못하며 계전기 오동작으로 보는 견해도 있음).

② Jim Bridger에서 서쪽으로 가는 3개의 345kV 선로 중 2개 선로 차단은 Jim Bridger발전소의 사고대처방안(Remedial Action Scheme)에 의거 4대 발전기 중 2대가 정지됨(발전량 손실 : 520MW×2대).

③ IPC(Idaho Power Company)시스템의 서부지역으로부터 수력발전에 의한 발전손실대체를 시도하였으나 중부하가 걸려있는 Brownlee, Boise에서 전압이 떨어지기 시작함.

(3) 후속조치 및 복구

IPC 운전자들이 7월 2일자 사고와 동일 유형의 사

고임을 인지하고 IPC지역에서 약 1200MW의 부하를 수조작으로 차단하였고 이 조치로 7월 2일에 있었던 전압붕괴 사고의 반복을 피할 수 있었으며 이후 모든 부하가 곧바로 복구되었다.

나. Oregon 500kV 선로 사고 ('96년 8월 10일 15:42 Past)

(1) 사고전 계통상황(그림 3 참조)

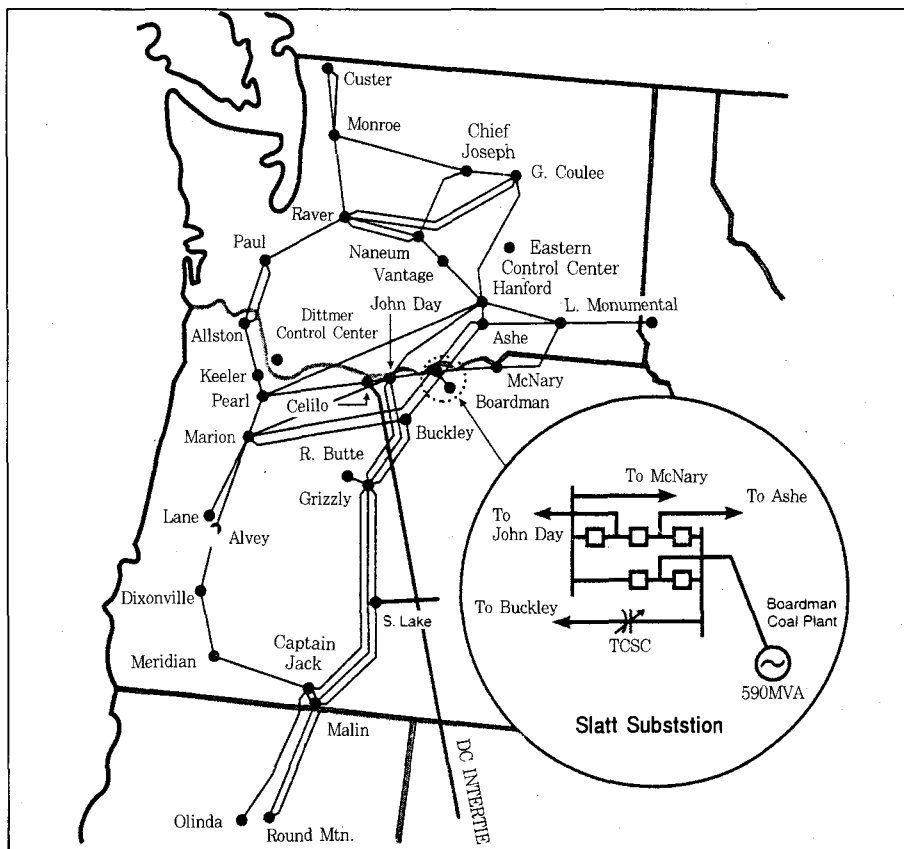
① Portland 부근 3개의 500kV 경부하 선로가 수목 접촉사고 및 차단기 비투입으로 운전이 중지된 상태에 있었음.

② Allston-Rainier 115kV 선로 및 Longview-Lexington 115kV 선로의 선로보수 및 공사를 위하여

운전 정지되어 있었음(이것이 Keeler-Allston 500kV 선로사고후 계통 Stress를 증가시키는데 큰 영향을 미침).

③ Marion에 설치된 500kV 차단기, Keeler에 설치된 500kV차단기와 500/230kV 변압기가 개수(改修, Modification)작업을 위하여 운전 정지되어 있었음. Keeler의 SVC는 변압기 사고로 500kV 시스템 전압을 지지할 능력이 저하되어 있었음(BPA은 하절기 부하가 적어 여름에 Maintenance를 실시함).

④ 더운 날씨로 WSCC의 대부분 지역에 비교적 높은 부하가 걸렸고 이에 따라 Canada로부터 Washington, Oregon을 거쳐 California에 이르는 500kV 송전선과



<그림 3> 태평양 북서부 500kV송전계통

주간송전망(Interstate Transmission System)에 중 부하가 걸려 있었음(COI(California-Oregon Intertie) 선로는 4750MW까지 기록함).

⑤ BPA 운전원들은 Northwest지역이 이러한 중 부하로 인하여 적은 조류변화에 대해서도 전압이 크게 변화하는 Voltage Support문제가 있음을 인지하였음.

(2) 사고 발생 및 전개(그림 3 참조)

① 15:42:37 Past : Keeler-Allston 500kV선로가 중부하로 늘어지면서 수목에 접촉되어 섬락(Flashover) 사고가 발생하였고 이것이 추가적으로 Pearl-keeler 500kV선로까지 운전을 중단시킴(Keeler에 설치된 변압기 고장과 차단기 교체 작업 때문임). 이 두 선로의 운전 중단으로 Portland지역으로 들어가는 230kV, 115kV 평행선로들에 과부하가 걸리고 Hanford에서는 전압이 527kV에서 506kV으로 떨어짐. 전압유지를 위하여 McNary로부터 무효전력을 최대한으로 공급하게 하였고 5분 정도 계통전압을 지탱하였음.

② 15:47:29 PAST: St. Johns-Merwin 115kV 선로가 Zone 1 KD계전기의 오동작으로 차단됨. 이로 인해서 Keeler-Allston 500kV선로와 나란히 가는 다른 선로들에 부하를 가중시킴.

③ 15:47:36 PAST : 과부하로 운전하던 Ross-Lexington 230kV선로가 과부하로 늘어져 수목접촉에 의한 섬락이 발생하였고 이로 인해 Swift발전소의 207MW전력이 상실되어 Keeler-Allston 500kV선로와 나란히 가는 다른 선로에 부하를 가중시키고 계통전압이 떨어져 이미 최대의 무효전력을 내고 있는 McNary 발전소에 무효전력 증가가 요구됨.

④ 15:47:37 McNary 발전소 단위기들이 탈락되기 시작하면서(여자장치 Trip이 원인임) 전력 전압의 동요(Oscillations) 상승이 시작됨. 이러한 동요는 약 70초 동안 지속되면서 진폭이 증가되어 Malin에서의 동요진폭이 약 1000MW 및 60kV Peak-to-peak에 이르렀는데 이 계통 동요가 COI 분리와 뒤따르는 계

통분리(Islanding)의 주요 원인이 되었음.

⑤ 전압보상과 동요억제를 위하여 15:48:51에 Malin에서 제4그룹 병렬 커패시터가 투입되었고 곧 이어 Grizzly 남쪽 500kV 3회선에 대하여 Fort Rock 직렬 Capacitor가 삽입되었으나 이와 동시에 Buckley-Grizzly 선로가 Zone 1 Relay 동작으로 개방되었음.

⑥ 15:48:52에 저전압 때문에 500kV COI 3회선 선로가 차례로 차단되었음.

⑦ COI을 통하여 남하하던 조류가 COI 분리에 따라 Idaho, Utah, Colorado, Arizona, New Mexico, Nevada, Southern California를 통하는 전력 Route들에 충격을 주었고 많은 지역연계선 등은 저전압과 보조가 흐트러짐(Out-of-step) 때문에 차단되었으며 계통이 몇 개의 Island로 나뉘어졌다.

(3) 사고 규모

WSCC 15개 주가 모두 사고 영향을 받았다.

- 정전수용가 수 : 749만호
- 탈락 부하 : 30,489MW
- 발전 손실 : 27,269MW

(4) 사고 분석

① 단일 사고에 대한 계통안정성 미확보를 인지하지 못하고 계통을 운전하여 사고 과급을 미연에 방지하지 못했다.

② McNary 발전소의 모든 단위 발전기가 Keeler-Allston 500kV 선로 사고 및 후속되는 선로 사고에 따른 저전압에 대응하는 동안 Exciter Protection기능에 의하여 탈락되었고, 이어 계통의 전압 주파수 동요가 발생하였으며 이 계통 동요를 효과적으로 억제하지 못한 것이 COI 분리의 직접적인 원인이 되었다.

③ COI 분리직전인 15:48:51에 계통동요가 증폭되어 전압불안정상태에 이르렀으며 처방조치(Remedial Action)로 조상용량을 투입한 것이 곧바로 전압붕괴로 이어졌다(전압안정도 분석과 긴급 처방방법이 적절하지 못했음).

이상에서 금년 여름 미국 WSCC 광역 정전 사고의 개요를 훑어 보았다.

### 3. 문제점 및 의문점 분석

대형사고 뒤에는 항상 여러 가지 문제점과 의문점이 노출된다. 미서부광역정전사고 역시 예외는 아니며 많은 문제점이 노출되었고 또한 적지 않은 의문점이 지적되었다. 앞으로의 또 다른 이들 의문점과 문제점을 해결하는 것이 광역정전사고를 예방을 위한 급선무라고 할 수 있을 것이다. 지난 해의 2차에 걸친 광역정전사고에서는 시발사고의 원인분석에 상당한 의문점이 있으며 사고파급을 막기 위한 적절한 조치를 취함으로써 광역정전사고를 막지 못한 것이 문제점으로 지적되고 있다. 의문점과 문제점을 간략히 기술하면 다음과 같다.

1) 7월 2일자 사고에서 Kinport-Jim Bridge 345kV 선로가 수목접촉에 의하여 차단됨과 동시에 Goshen-Jim Bridge 345kV 선로도 동시에 차단되었는데 그 원인이 계전기 오동작으로 결론 지워졌으나 7월 3일에 일어난 똑같은 사고의 반복이 많은 의문점을 안고 있다.

2) Malin 변전소에는 전압 보상을 위하여 충분한 병렬Capacitor 설비를 보유하고 있으나 7월 2일의 사고와 8월 10일의 사고에서 제4Group Capacitor가 두번 다 제기능을 발휘하지 못했고 이것이 COI 500kV 선로 분리에 결정적인 요인이 되었다.

따라서 Capacitor 설비운영방법과 계통구성에 문제점은 없는지 재검토가 요망된다(지난 해에 있었던 두번의 광역정전에서 Malin-Round Mountain 500kV 2회선이 Travelling Wave Relay가 동작하여 차단된 것이 공통점으로 보고 되어 있음).

3) 7월 2일자 사고는 '94년 12월 광역정전사고와 같은 지역에서 발생했으나 과거사고에 대한 경험을 사고예방으로 연결시키지 못했고 앞으로의 유사한 사고

발생우려를 불식시킬 만한 대책을 이번에도 세우지 못했다.

4) 8월 10일자 사고에서 특기할 것은 Malin에 병렬 콘덴서를 투입함과 동시에 Grizzly남단 3회선에 직렬 콘덴서를 투입하자 곧바로 Buckley-Grizzly선이 차단되었다는 사실이다. Buckley-Grizzly선은 TCSC(Thyristor-Controlled Series Capacitor)가 설치되어 있는 Buckley-Slatt선과 연결되어 있는 선로로서 COI 3회선 중 가장 견고성(Stiffness)이 큰 선로임에도 불구하고 이 선로가 먼저 차단되었으며 이것은 기존의 이론으로는 설명하기 곤란한 사건이라고 생각된다.

5) COI 선로 차단이 계통분리의 직접적인 원인임에도 불구하고 작년 한해 동안 2차의 사고를 겪은 다음에도 과거의 긴급대처방안에 대한 문제점을 정확히 분석하지 못하고 있어 앞으로의 연구와 개선이 필요하다고 생각된다.

### 4. 맺음말

작년 2차에 걸친 미서부 광역 대정전사고는 경악을 금치 못할 만큼의 충격적인 사건이었고 그 사건 이후 국내에서도 국가안보차원에서 전력계통점검이 실시된 바 있다. 첨단장비와 최고의 기술을 자랑하는 미국에서조차 이러한 사고가 발생한다면 우리나라 계통에도 대정전사고의 가능성은 항상 존재한다고 볼 수 있다. 우리나라에서도 생활수준의 향상으로 냉방부하가 매년 크게 증가하고 있고 하절기 기후조건에 따라 부하가 급증할 수 있으며, 그에 따라 구미에서 겪고 있는 계통불안정이 초래될 가능성이 커지고 있음이 분명하다.

그러므로 우리는 외국의 사고를 타산지석(他山之石)으로 삼아 계통보강, 전압안정도확보 및 계통동요억제 관련 신기술확립 등 대정전사고를 예방하기 위하여 특별한 노력을 기울여야 할 시점에 와 있는 것으로 생각된다.