

러시아의 특별고압 전력계통 ②

- 1991년 이후의 소련연방 전력계통의 발전 및 구조적인 문제와 해결책 -



한전 중앙교육원 배전교육팀
교수 김재성

구 소련연방은 수십년 동안 경제적으로 또 어느 정도로는 기술적으로도 서방세계로부터 고립되어 있었다. 이 기간동안 러시아의 전기기술자들은 최고전압이 1,200kV에 이르는 대규모 특별고압 전력계통망을 설계·건설하였으며, 이 전력계통망은 러시아의 전력설비를 이용하여 건설되었다. 이러한 전력망 구축과 기술적인 문제해결 경험은 전세계의 송전기술자들에게 실제적인 흥미를 줄 수 있을 것이다.

이 글은 일반적인 개요 및 러시아와 미국 특별고압 전력계통의 기술적인 비교에 대한 것으로서 러시아의 여러 기술서적, 잡지 및 개인적인 경험을 토대로 작성한 것이다.

대표적인 장비 및 선로파라미터

모든 362kV 변압기와 대부분의 525kV 변압기는 3상변압기이다. 반면에 787kV와 1,200kV 변압기는 단상변압기 세 개로 구성되어 있다. 모든 분로리액터는 단상 고속재폐로시의 2차 아크전류를 억제하기 위해 연결하는 중성리액터를 쓸 수 있도록 중성점이 절연된(1분, 교류시험전압 85kV) 단상리액터이다.

특별고압 차단기는 주로 공기차단기이며 단락전류 40kA와 63kA로서 고장제거시간은 2사이클이다. 피뢰기는 GSOA(Gapped Silicon Oxide)와 MOV 두 종류가 생산되며 개폐서어지와 낙뢰서어지 및 차단전류 특성은 표 1와 같다. 특별고압선로의 대표적인 파라미터들은 표 2와 같다.

지난 몇 년간 러시아의 엔지니어들은 상간거리를 감소시킨 콤팩트선로 설계를 사용하였다. 이 방법은 특별고압 송전선의 송전용량을 증가시켰다. 콤팩트선로는 직렬보상보다 더 경제적이라는 데 근거를 두고 있다. 새로운 설계방법에서 525~1,200kV의 상간거리는 표 2의 수치와 비교하여 대략 1.5배 정도 감소하였다. 이 경우에 코로나 손실 감소를 위하여 전선은 각각 보다 작은 단면적을 가진 도체들의 다발(다도체)로 이루어져 있다. 즉 525~787kV 240mm 전선은 6개의 ACSR 도체(6 Bundle)로 이루어져 있으며, 1,200kV 240mm 전선은

<표 1> 피뢰기 특성

구 분	피뢰기 Type	정격 전 압, kV			
		362	525	787	1,200
개폐서어지	GSOA	2.7	2.5	2.1	1.8
제 한	p.u	MOV	1.8	1.8	1.8
개폐서어지	GSOA	1.0	1.5	1.8	1.5
전 류	kA	MOV	0.7	1.2	1.8
낙뢰서어지	GSOA	2.85	2.9	2.6	2.05
제 한	p.u	MOV	2.2	2.15	2.05
낙뢰전류	GSOA	10	10	10	14
kA	MOV	5	10	10	15

11개의 도체(11 Bundle)로 구성되어 있다. 362kV 송전선은 새로운 설계로 건설되었다. :비대칭으로 위치한 도체다발 4개의 선간거리가 공장 중간과 철탑에서 다르다. 그리고 다른 형태의 전선배열이 연구되고 있다. 송전용량은 적절한 설계에 의하여 60%까지 증가할 수 있다.

절연레벨과 과전압보호

러시아의 특별고압 전력계통과 장비는 미국에 비해 더 강화된 절연레벨로 설계되고 있다. 특히 특별고압 장비의 치수에 영향을 미치는 장비의 SIL은 362kV급은 2.7p.u., 525kV급은 2.5p.u., 787kV 급은 2.1p.u., 1,200kV급은 1.8p.u.이다. 미국에서 세계의 전압레벨에 적용하고 있는 대표적인 수치는 이보다 다소 낮은 2.6, 2.2 그리고 1.8p.u.이다.

특별고압 송전선의 개폐서어지 전압은 통상적으로 장비의 SIL보다 5~10% 초과한다.

높은 절연레벨로 인해 장비의 값이 비싸지는 것은 러시아 송전계통의 특수한 여건에 비추어 볼 때 어쩔 수 없다. 송전거리가 길고 송전부스의 리액턴스가 증가하여 분로보상 정도가 감소하는 송전계통은 심각한 개폐서어지 특히 일시적인 과전압이 발생하기 쉬운 것이다. 차단기의 과도회복전압도 미국보다 나쁜 조건이다.

러시아의 기술표준에 0.1초에서 수시간 동안의 일시적인 과전압에 견딜 수 있어야 한다는 특수조건이 도입되었다. 특히 모든 장비는 8시간동안 1.025p.u., 1시간동안 1.075p.u., 20분동안 1.1p.u.의 전

압에 견뎌야만 한다. 정격전압과 장비의 종류에 따라서는 20초동안 1.25~1.6p.u., 1초동안 1.3~2.2 p.u.의 전압에 견뎌야 한다. 이 기준에는 변압기 자체시스템의 과여자와 차단기의 과도회복전압과 관계되는 약간의 부가제한이 포함되어 있다. 러시아는 전기장비에 의무적으로 내순간과전압 조건을 요구하는 유일한 국가이다. 확립된 수치가 추가적인 절연강화를 요구하는 것은 아니다. : 그들은 기존 절연의 본래의 세기를 사용한다.

산화금속 피뢰기의 도입으로 특별고압 송전계통에서 SIL레벨(362~787kV급 1.8p.u.와 1,200kV급 1.6p.u.)이 감소된 장비를 사용할 수 있게 되었으며 심각한 순간과전압을 조건으로 하지 않아도 되게 되었다.

러시아 특별고압 송전계통의 과전압보호시스템은 계통에 설치된 피뢰기와 분로리액터를 기초로 하고 있다. 러시아의 차단기에는 1,200kV급을 제외하고 미리 내장된 피뢰기를 사용하지 않고 있다. 개폐 가능한 분로리액터는 과전압 발생 즉시 또는 발생 전에 선로에 연결될 수 있는 자동장치나 스파크갭을 각각 갖추고 있다. 분로리액터 스파크연결에 적용되는 공기차단기는 분리되어 제어되는 모듈의 두 그룹으로 구성되어 있으며 한 그룹은 특별히 개발된 공기스파크갭에 의해 분리되어 있다.

자동장치는 프로그램할 수 있는 선로와 리액터 개폐에 사용될 때 과전압 보호에 핵심적인 역할을 한다. 예를들어 그런 장치는 순간과전압 기간이 감소하는 동기화동안 고속으로 차단기를 폐로하게

러/시/아/의/특/별/고/압/전/력/계/통 ②

<표 2> 러시아 특별고압 교류송전선의 대표적인 파라미터

구 분	정 격 전 압, kV			
	362	525	787	1,200
송전용량, GW	0.4	1.0	2.1	4~6 *
표준 길이, km	25~150	50~300	300~550	400~700
상간 거리, m	8~8.5	12~14	17.5~19	21.5
인덕턴스 X ₁ , Ohm/km	0.32	0.3	0.29	0.27
용량도전율 b ₁ , 10 ⁻⁶ 1/Ohm, km	3.5	3.9	4.0	4.4
변들도체수/거리, m	2/0.4	3/0.4	5/0.3 or 4/0.4	8/0.4
변들의 최소 ACSR 도체 단면적, mm ²	300	330	300	300

주) * 인접한 전력망의 제어가능한 분로보상과 자동조정 사용

된다. 단락회로가 개로되기 전에 분로리액터가 선로의 전전상에 연결되는 비대칭 단락회로의 제거 시 연속적인 개폐역할도 자동장치가 수행한다. 이것은 순간과전압과 개폐과전압을 감소시키게 된다.

다수의 현장과 작동시험 기간동안 몇몇 787kV 송전계통에서 제2고조파 과전압의 자기여자 현상이 종종 발견되었다. 이런 과도현상이 수십초간 존재하고 1.5~1.7p.u.에 달하였으며 이것은 특별고압 절연에 과도한 것이다. 차단기 운영시퀀스와 자동장치 사용법을 적절히 선택하면 이런 송전선을 안전하게 운영할 수 있다.

2단계 순간과전압 보호릴레이 계획이 러시아의 모든 송전계통에 역시 사용되고 있다.

운전모드의 특성

지난 몇 년을 제외하면 러시아의 특별고압 송전계통은 중부하상태였으며 또한 발전용량이나 안정도 역시 여유가 없었다. 전압수준 또는 안정도 한계에 의해 결정되는 러시아 장거리송전선의 송전용량은 비교적 낮은 수준의 분로보상과 중부하상태에서의 분로리액터 개폐능력에 의해 증가될 수 있었다. 예를들어 분로리액터 그룹330Mvar의 보상에 의해 787kV 선로의 송전용량은 100MW까지 증가된다. 사례가 증가하고 있는 순간과전압 문제는 스위칭시퀀스의 적절한 선택과 자동장치의 적용으로 해결하였다. 인접한 계통과 발전기들에 무효전력이 흘러 들어가는 다른 문제가 발생하였다. 세밀한 분석후 525~787kV 송전계통으로부터 과도한

무효전력이 인접한 계통으로 흘러가는 것이 허용되었다. 실제로 400~800Mvar의 조류가 사용되었고 따라서 단지 330Mvar의 세그룹만으로 787kV 546km의 선로운영이 가능하였고, 분로리액터 없이는 334km의 선로운영이 가능하였다. 수년동안 787kV 계통망은 계획된 리액터의 2/3만으로 운영되었다. 그 당시에는 분로리액터의 초기설계 실패율이 증가하는 것과 동시에 전력계통이 집중적으로 성장했기 때문에 이것은 매우 중요했다. 따라서 충분한 리액터를 갖추는 것이 불가능했다.

특별권고가 작성되었고 작용 않는 단상리액터군을 어떻게 사용할 것인지 부분적으로는 효과가 있었다. 거기에는 개폐시퀀스 개선과 자동장치 적용 및 릴레이세팅의 적절한 변경 등이 포함되어 있다.

낮은 수준의 분로보상은 경부하시 과도한 전압상승을 일으킨다. 전력소비가 감소한 지난 몇 년간 이같은 현상은 광범위하게 발생하였다. 전기품질을 개선하기 위해 분로리액터 수의 증가와 제어 가능한 500kV 분로리액터 및 고정 무효전력 전원의 완성이 계획되었다. 특히 제어 가능한 10kV 50Mvar의 고정모들이 사용될 것이다.

러시아의 전력풀은 발전과 송전용량의 필수적인 여유의 결여로 126kV로부터 출발하여 모든 선로에 단상고속도재페로(SPR)를 폭넓게 적용하는데 특별한 주의를 기울여야 한다. 이 재페로는 특히 특별고압 선로에 매우 효과적이었다. 러시아의 SPR 재페로시간은 2차 소호전류에 따라 0.6초에서 3초까지 다양하다. 최대시간은 요구되는 과도안정도와 아크소호와 관련된 실제경험에 의해 제한된

<표 3> 러시아 특별고압 전력계통의 고장통계 데이터

구 분	정 격 전 압, kV			
	362	525	787	1,200
○ 송전선로				
정전율, 100km당 연간 고장	1.5	0.6	0.2	0.12 *
단상단락률, %	75	92	98	100 *
단상고속재폐로 성공률, %	72	56	52	*
단상과 3상고속재폐로 성공률, %	76	62	52	*
평균 복구시간, 시간		6.2	5.8	10.5
○ 장 비				
변압기, 1상당 연간 고장		0.038	0.107	0.13
복구시간, 시간		51	112	5,090
분로리액터, 1상당 연간 고장		0.175	0.068	0.25 *
복구시간, 시간		45	198	23

주) * 조사가 충분치 못한 내용

다. 장거리 787kV 선로 일부에는 2차 아크전류를 억제하고 재폐로시간을 단축하기 위해 4-legged 리액터가 설치되어 있다. 적절한 재폐로장치는 아크소멸 즉시 재폐로하거나, 아크가 소멸되지 않을 경우 다른 두상을 트립시키기 위해, 아크소멸과정을 모니터하기 위하여 설치되어 있다. 그와 같은 개선된 재폐로장치는 전력계통의 전기경제적인 동요를 최소화하기 위한 순간에 트립과 재폐로를 시켜준다.

전력폴은 전력계통 붕괴를 자동적으로 막아 주는 계층시스템을 만든다. 전국적인 계통연계는 이 목적을 달성하는데 매우 유리하다.

공급경험

장비 및 선로사고 데이터는 소련연방, 지금은 러시아 전국에서 수집되었다. 러시아 특별고압 선로의 특정사고율은 미국과 캐나다의 사고율과 유사하다(표 3).

러시아 특별고압 장비의 고장률은 주로 제조상의 결함때문에 서구의 고장률보다 높다(제조결함과 관련된 고장이 전체의 65~70%에 달한다). 여러가지 운전 감시장치와 릴레이 보호가 특별고압 붓싱 또는 분로리액터용 차단기의 파손 같은 사고를 예방하기 위해 사용되고 있다. 예를들면 붓싱

의 보수/교체계획을 수립하거나 과도한 전류변화가 감지될 때 자동으로 설비를 차단하기 위해 붓싱절연의 표유용량을 통하는 전류의 주파수 감시가 사용되고 있다. 자동장치는 차단기 접점이 분리될 때 높은 과도회복전압으로 인하여 차단기 무효전류의 소호가 어려워지므로 분로리액터용 차단기를 투입시켜 준다. 자동장치는 차단기가 단락전류를 차단하지 못하면 선로의 다음 차단기에게 신호를 보내 적은 지연시간으로 고장을 차단하도록 한다. 부분방전 감시장치가 변압기와 분로리액터에 사용되고 있다. 이와 같은 감시장치는 미국과 캐나다에서 지금 사용하고 있다.

특별고압 계통의 릴레이 보호와 다른 자동장치는 높은 신뢰도를 가지고 있다. 운용중인 릴레이 보호장치의 오동작은 0.45%에서만 관찰되며 고장 사이의 평균기간은 464년이다. 다른 자동장치들의 오동작 확률은 0.27%이며 오동작 평균기간은 402년이다.

출 처 : IEEE Power Engineering Riview 誌
(1997年 6月)