



500kV 전력망 연계선 송전용량 증가를 위한 직렬콘덴서 적용 현황

IEEE EPEC(Electric Power and Energy Conference) 회의에서 발표된 논문을 2회에 걸쳐 소개합니다. IEEE EPEC(Electric Power and Energy Conference)는 IEEE Power and Energy Society 주관으로 열리는 학회로 캐나다에서 열리는 전력 및 에너지 분야에서 가장 규모가 큰 학회 중의 하나입니다.

발표논문 가운데 현재 이슈가 되고 있는 주요 논문 두 편('전력망 송전용량 증가를 위한 직렬콘덴서', '전기에너지 저장기술')을 나누어 연재합니다. <편집자 주>

Rolf Gruenbaum IEEE Senior member

Jon Rasmussen IEEE member

Chun Li

요약 2011년 캐나다 온타리오 송전선로에 전력연계장치의 송전용량을 증가시켜 온타리오주 내의 송전전력 요구 증대에 부응하기 위한 목적으로 2개의 500kV 직렬콘덴서를 도입하였다. 직렬콘덴서와 함께 보호개념 및 기술이 크게 한 단계 진전된 새로운 고속보호장치(FPD)를 설치하였다. 본 논문에서는 이러한 설계 내용뿐만 아니라 직렬콘덴서의 두드러진 기타 설계특성을 언급하고 또한 전력계통 기능에 대한 이들 장치의 장점을 강조하고자 한다. 특히 기존의 선로 차단기에 대한 과도회복전압의 제한특성을 강조하고 또한 부적절하게 연계된 장거리 가공선로에 대한 직렬콘덴서 설계의 영향에 대해서도 언급한다.

1. 개요

전 세계적으로 여러 지역에서 전력요구가 증가됨에 따라 전력계통도 이에 부응하기 위해 발전되어 왔다. 그러나 송전선로 건설에는 막대한 비용과 시간이 필요하고 또한 심각한 환경적 제약이 수반되기 때문에 더 많은 송전선로의 건설만이 최선의 방법은 아니다.

직렬콘덴서로 기존의 장거리 송전선로의 송전용량을 크게 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 캐나다 전력회사 Hydro One에 직렬 콘덴서 적용사례를 제시한다. Hydro One은 온타리오주에서 최대의 송배전회사이다. 이 회사는 실제로 온타리오주의 모든 송전계통, 대략 온타리오 송전용량의 96.6 %를 소유하여 운영하는 최대 전력회사이다.

II. 기본 원리

직렬보상법은 전 세계 여러 나라의 교류송전계통에서 여러 해 동안 우수한 실적을 내면서 사용되어 왔다. 송전 계통의 위상각 및 전압 안정도와 관련된 잘 알려진 표현을 통해 설계개념의 유용성을 예시할 수 있다(그림 1).

A. 위상각 안정도 개선

위상각 안정도 개선 측면에서 직렬보상법은 매우 효과적이다. 직렬보상을 통해 선로 양단 간의 총 리액턴스는 감소된다. 선로를 통한 전력전달은 대략 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{U_1 \times U_2}{X_L - X_C} \times \sin \delta \quad (1)$$

여기서 P = 전달되는 유효전력

U_1 및 U_2 = 송전회로 양단 전압

X_L = 선로 리액턴스

X_C = 직렬 콘덴서 리액턴스

δ = 선로 양단간 상차각

(1)식에서 명백하게 직렬 리액턴스가 감소시키면 유효 전력의 흐름을 증가시킬 수 있다. 다시 말해, 분모에 반대 부호의 리액턴스(즉 용량성 리액턴스)가 개입되면 종단 전압간의 상차각을 증가시키지 않아도, 즉 연계선의 위상각 안정도를 저해시키지 않고도 송전전력의 증가가 가능해진다.

유사하게, (1)식의 분모에 용량성 리액턴스를 개입시키면 상차각이 감소하여도 송전용량이 영향을 받지 않는다. 즉 연계선의 위상각 안정도가 증가한다.

직렬보상의 영향을 동기화 토크의 증가, 즉 (1)식에서 주어진 전력과 상차각 관계의 기울기를 이용한 대체적인 방법으로도 표현할 수 있다.

직렬보상을 통한 송전 리액턴스의 영향으로 병렬회로 간의 부하공유 최적화가 가능해져서 그에 따라 전체적인 송전용량도 더욱 증가하게 된다.

B. 전압안정도 개선

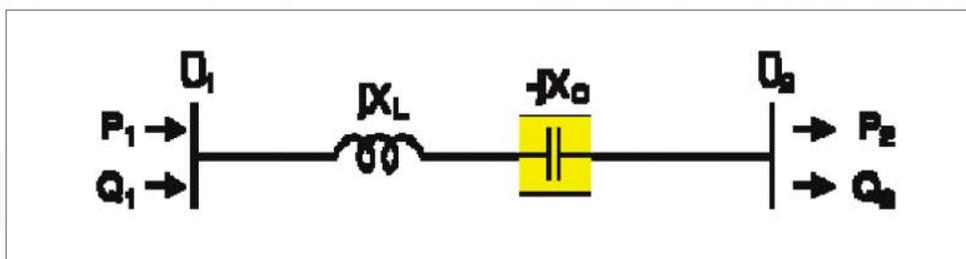
송전회로의 전압은 유효전력(P)뿐만이 아니라 무효 전력(Q)의 흐름에도 의존한다.

$$U = f(P, Q) \quad (2)$$

이들 양자 간의 명확한 관계식은 간단하지 않다. 그러나 면밀한 분석에서 송전선로와 직렬 콘덴서에 의한 무효 전력 기여도는 회로의 무효전력 평형 유지능력을 개선시켜 송전전압을 안정시키는 것으로 나타나 있다.

또한 이 무효전력 기여도는 순시적이며 자동조절 특성, 즉 선로부하가 증가하면 무효전력 기여도 증가하고 그 반대로 성립하는 특성을 나타내고 있음이 판명되었다.

결과적으로 콘덴서에 의한 무효전력은 실제로 동적인 방법으로 전압 안정도에 기여한다. 따라서 직렬보상법은 중부하 송전회로의 전압 안정도를 유지하거나 안정도를



[그림 1] 직렬보상 송전통로

증가시키는데 매우 효과적인 방법이 된다. 또한 전압 안정도를 저해시키지 않고도 송전회로에 추가적인 전력 전송을 가능하게 해준다.

C. 보상을

리액턴스가 XC인 용량성 회로요소, 즉 직렬 콘덴서와 선로의 유도성 리액턴스가 XL인 경우 직렬보상율의 척도 k를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k = \frac{X_C}{X_L} \quad (3)$$

송전회로에 적용하는 경우 보상율은 항상 $0.3 \leq k \leq 0.7$ 범위 내에서 선정된다.

XC를 k로 치환하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$P = \frac{U_1 \times U_2}{X_L(1-k)} \times \sin\delta \quad (4)$$

이 식에서 연계선의 송전전력 개선은 직렬콘덴서의 보상율과 직결됨을 알 수 있다.

D. 직렬보상의 유용성

송전회로에서의 전체적인 직렬보상의 영향은 그림 2와 같이 요약할 수 있다.

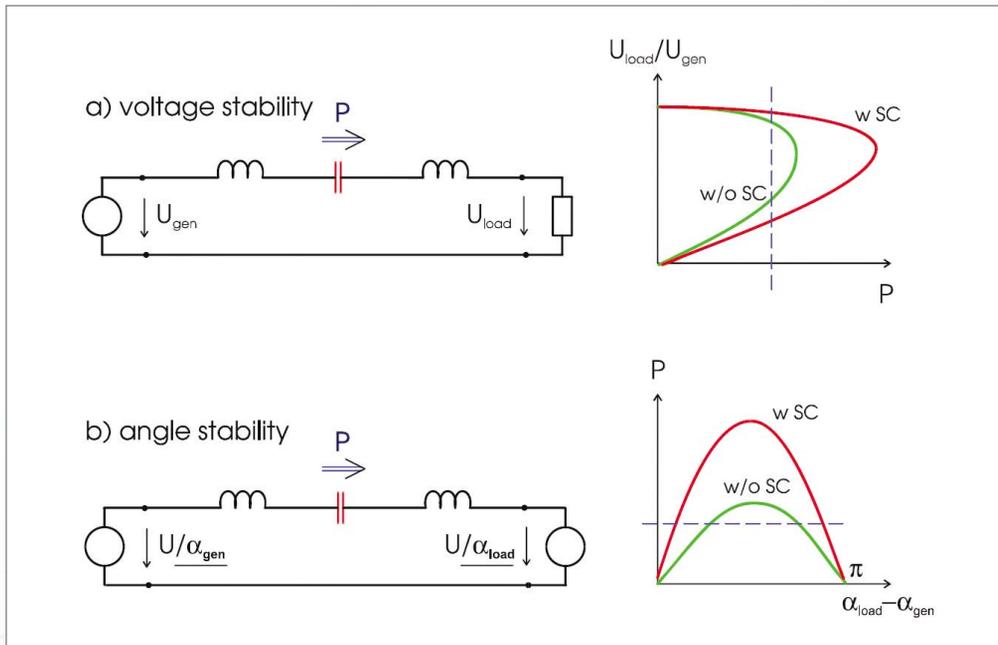
송전회로의 직렬보상의 몇 가지 이점을 요약하면 다음과 같다.

- 위상이나 전압 안정도를 저해하지 않고 송전회로의 유효전력을 증가시킨다.
- 송전용량을 감소시키지 않고도 위상 및 전압 안정도를 증가시킨다.
- 요구되는 초고압 송전회로의 수를 감소시킨다.

III. 송전전력 증대

Hydro One은 캐나다 온타리오의 500kV 송전망에 최근 설치된 2개의 직렬콘덴서이다. 각각의 직렬콘덴서 정격은 500kV 계통전압에서 750MVar 이다.

온타리오의 500kV 송전계통에서 북동부 구역은



[그림 2] 직렬콘덴서의 a) 전압 및 b) 위상각에 대한 영향



[그림 3] Hydro One 500kV Hammer-Essa 간 전력통로

Sudbury의 Hammer 변전소와 Barrie의 Essa 변전소 간의 2개의 단일 회선으로 남쪽 구역과 연결되어있다 (그림 3). 직렬 보상이 없으면 새로운 전력생산으로 인해 이들 선로에 전력혼잡이 증대되었을 것이다.

선로의 대략 중간지점인 Nobel 변전소에 직렬콘덴서를 설치하여 선로의 송전용량을 증대시켜 이들 회로의 용도를 극대화한다(그림 4).

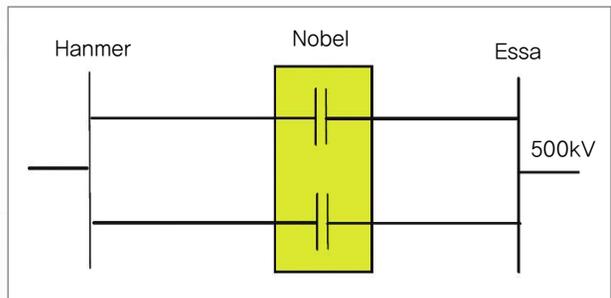
전력통로의 전체 길이는 대략 200km이다. 전력계통 검토를 완료한 후, 2008년에 Hydro One의 구매절차를 시작하였다.

IV. 선정기준

회사가 공사인 관계로 Hydro One은 공개입찰을 통해 기기를 구매하였다. 입찰에 참여한 공급자가 제출한 제안서를 면밀히 검토, 평가하여 채점하였다. 채점기준

에는 규격서와의 적합성, 품질, 자본금, 수명주기, 비용 및 공급자의 과거 실적 등이 포함되었다. 다양한 제안서 평가의 주요 난점은 고가이며 복잡한 설계를 기술적으로 만족시키면서도 최저 비용의 납품여부 였다.

Hammer-Essa 500kV 선로에 직렬 콘덴서를 삽입 하면 선로의 고장을 제거하는 터미널 차단기에 과도회복 전압(TRV)이 더 과도하게 발행한다는 사실이 연구를 통해 지적되었다. 이 점 때문에 이 사업에서는 고속우회 메카니즘의 중요성이 강조되고 이 점이 선정 기준 요소 중의 하나가 되어 ABB의 제안서를 선정하게 되었다.



[그림 4] Hammer-Essa 직렬보상 송전회로

V. 주요 설계특성

직렬콘덴서의 주요 설계데이터는 다음과 같이 요약할 수 있다. (양 직렬콘덴서가 모두 동일한 기술적 데이터를 갖는다)

계통전압	500kV
정격전류	2330A
과부하전류, 15분	2700A
정격 리액턴스	46Ω
정격 콘덴서군 전압	107kV
정격 무효전력	750MVar
보상율	50%
MOV 정격(중성선)	70.5MJ
MOV 정격(외선)	46.2MJ

설치 지역의 주위 조건은 때로는 극심하게 춥지만 서늘하고 때로는 더운 여름 날씨이지만 따뜻한 전형적인 온화한 날씨이다. 이들 조건을 기준으로 직렬콘덴서는 -50 ~ +40 °C 주위온도 범위를 견디는 온도 정격을 갖는다.

500kV 가공선로가 교차하는 2개의 직렬 콘덴서 설치 현장의 파노라마 뷰는 그림 5와 같다.

A. 주회로 설계

직렬콘덴서는 각 상당 하나의 구획(segment)으로 구성된다. 직렬콘덴서 보호체계(그림 6)는 금속산화물 바리스터(MOV), 한류감쇠장치(CLDE), 고속보호장치(FPD) 및 우회스위치(B)로 구성된다. 우회개폐기는 스프링 작동기구를 갖는 SF₆형이다.

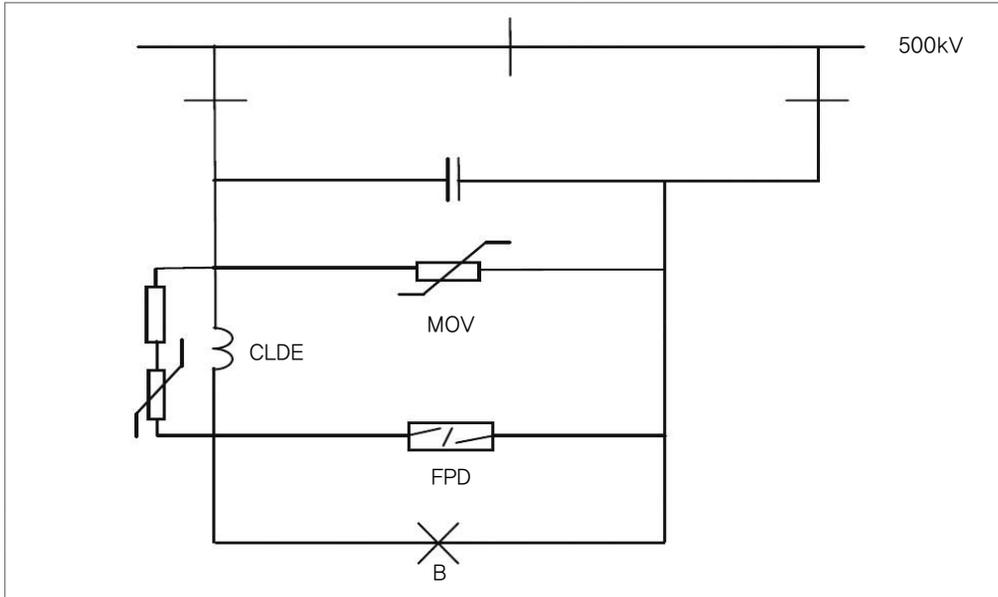
CLDE는 한류리액터와 리액터와 병렬로 연결된 저항 및 바리스터로 구성된다. 저항 설치의 목적은 콘덴서 방전 전류의 감쇠기능을 추가하여 우회 작동 이후의 콘덴서에 인가되는 전압을 감소시키는 것이다. 바리스터의 설치 목적은 정상상태 동작기간 중에 감쇠 저항에서의 기본 주파수 손실을 방지하기 위함이다.

MOV는 직렬콘덴서를 우회시키지 않고도 외부 고장, 즉 직렬보상회로 외부에서 나타나는 고장으로 인한 에너지를 지탱하기 위해 설계되었다. 콘덴서 군은 내부 고장, 즉 직렬콘덴서가 설치된 동일한 회로에서의 고장이 발생한 경우 우회시킬 수도 있다.

각각의 직렬콘덴서는 2개의 격리 단로기와 하나의 우회 단로기를 통해 선로와 연결하거나 단로시킬 수 있다.



[그림 5] 2개의 Nobel 500 kV 직렬콘덴서의 파노라마 뷰



[그림 6] 하나의 직렬콘덴서 단선도

B. 위상 불평형 허용치

500kV 선로의 연가가 제한적이기 때문에 송전통로의 상 임피던스는 다소 불평등하다. 결과적으로 단락전류는 상마다 다르다.

이 편차를 절충하기 위해 2개의 직렬콘덴서의 경우 동일하게 3상의 MOV정격을 서로 다르게 설정한다. 설계를 단순하게 하기 위해 바깥쪽 상의 정격은 이들 상에서 선정된 가장 보수적인 MJ 값으로 동일하게 설정한다.

- 종래의 스파크갭에서 보다 작은 부하가 흐를 가능성이 있기 때문에 이 경우 직렬콘덴서에 나타날 수 있는 전압 범위에 대해 콘덴서 우회가 가능하다.
- 장래의 직렬콘덴서 업그레이드 융통성이 증가된다.

캡슐형 설계는 Fast Contact(FC)라고 부르는 기계식 스위치와 Arc Plasma Injection(API)라고 부르는 강제 트리거형 스파크갭을 조합하여 제작이 가능하다. 이 두가지 모두 그림 7에 나타냈다.

C. 고속보호장치(FPD)

FPD 구조는 기밀봉지형의 초고속전력스위치 CapThor를 기반으로 하여 종래의 스파크갭을 대체한다(그림 7).

FPD는 MOV와 조합하여 동작하고 MOV내에서의 에너지방출을 감소시키기 위해 매우 제어된 방법으로 우회기능을 허용한다. FPD의 구조는 종래의 스파크갭에 비해 다음과 같은 장점을 가진다.

- 더 소형이다.
- 주위 환경에 영향을 받지 않는다.



[그림 7] CapThor. 우측이 API, 좌측이 FC

API는 2개의 전기아크나 플라즈마를 2개의 전극사이에 형성되는 갭으로 주입이 가능하도록 배치된 2개의 고전력 전극으로 구성된다. 이 장치는 2개의 전극 사이에 전기적 단락회로를 효과적으로 생성하게 된다. 전극은 직렬콘덴서 양단에 연결되고 이들 전극 간의 단락회로가 직렬콘덴서의 단락회로가 된다. 캡슐형 설계의 제어된 환경 또한 매우 낮은 전류에서 API로써 단락회로(SC)의 우회를 가능하게 한다. 우회시간도 우회개폐기만으로 직렬콘덴서를 우회시킬 때의 시간보다 매우 짧아진다. 언급한 바와 같이 FPD 개념은 과도회복전압(TRV)과 같은 공통적으로 직렬콘덴서와 관련되는 문제점에 대한 매우 효과적인 대책이다. 이 기능에 대하여는 본 논문 뒤에서 추가적으로 기술한다.

아크플라즈마주입장치(API)의 설계는 특정한 기체 및 전극재질에 대하여 플라즈마 갭의 파괴전압이 고유함수인 기체압력과 전극간격과의 곱에 의존한다는 물리적인 기본법칙을 기반으로 한다. 기체 압력을 높게 유지하고 트리거 절차를 효과적으로 설정하면 작은 치수의 물리적 플라즈마 갭이 가능하여 FPD가 소형화 된다.

추가적으로 플라즈마 갭의 압력이 높으면 방전 후 연소

생성물의 양이 상대적으로 작아지고 갭의 내전압용량도 크게 감소하지 않는다.

FC는 톰슨코일 작동장치를 기반으로 한다. 이 장치는 5ms 미만의 시간에 동작할 수 있는 개폐기의 생성을 가능하게 해준다. 접점이 중간위치에서 고착되지 않게 하기 위해 스프링이 있는 연결막대를 가진 견고한 장치를 사용한다. 이 장치는 신뢰성이 있고 빠른 속도의 동작을 가능하게 한다.

작동명령이 발생하면 트리거펄스가 API로 보내져 직렬 콘덴서군을 우회시킨다. 동시에 동작펄스가 FC로 보내져 투입동작이 시작된다. 5ms이내에 FC가 투입되었고 전류는 스위치 분로를 통해 분기하게 된다.

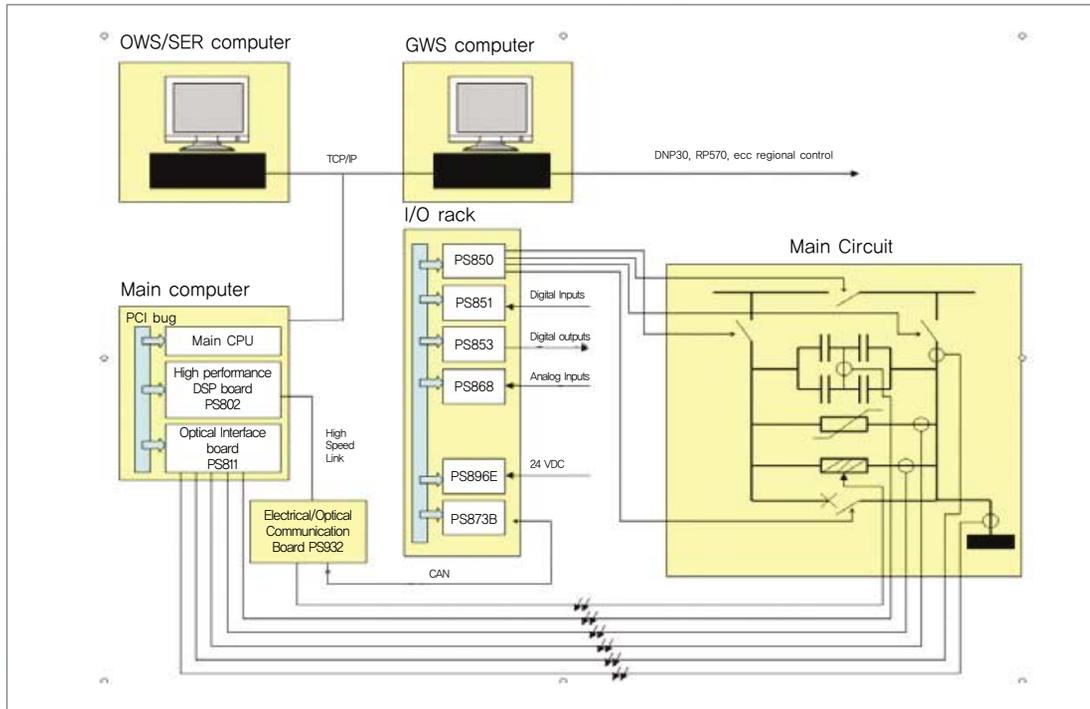
그림 8은 CapThor의 설치 현장 사진을 보여준다.

D. 제어 및 보호계통

제어계통은 전력용으로 특별히 개발된 하드웨어 및 소프트웨어 양 계통으로 구성된 MACH2 개념을 기반으로 한다. MACH2는 산업용 PC와 CAN 및 TDM과 같은 표준현장버스를 통해 연결된 추가보드 및 랙으로 구성된다(그림 9).



[그림 8] CapThor 설치 현장



[그림 9] MACH2 제어 및 보호계통 개요

직렬콘덴서는 2개의 서로 다른 위치에서 제어할 수 있다. 현장 직렬콘덴서 제어실에 PC기반의 운전원작업 스테이션(OWS)가 있다. 직렬콘덴서는 게이트웨이 스테이션(GWS)를 통해서도 제어가 가능하다. GWS는 표준 프로토콜을 통해 원격 통신을 가능하게 해주는 프로토콜 변환기이다.

제어 및 보호기능을 위한 전류는 광전류변류기(OCT)를 이용하여 측정한다. OCT는 고압모선내 전류신호변환기와 제어실내의 광 인터페이스 모듈로 구성된다. 신호변환기와 인터페이스 사이의 신호전송은 플랫폼 링크, 고전압신호 컬럼 및 광섬유 케이블이 포함된 광필터계통에 의해 수행 된다.

이 계통이 주는 장점은 다음과 같다.

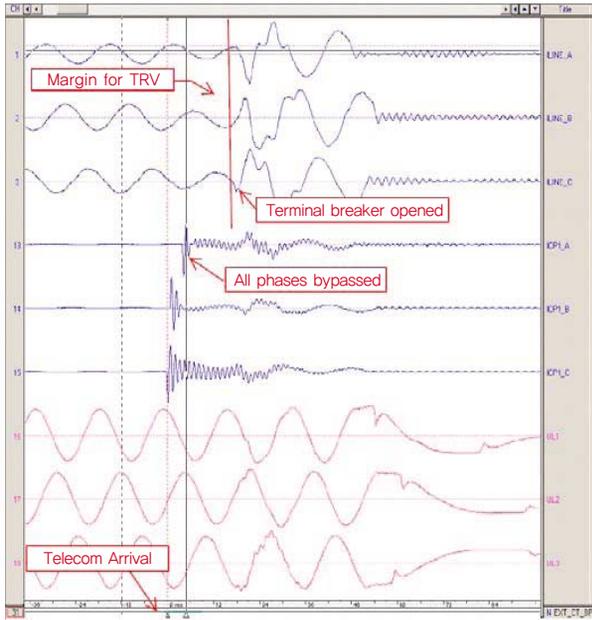
- 초고압 플랫폼 상에 계전기 보호 기기가 불필요하다.
- 광전류신호변환기는 접지수준에서 발생하는 빛을 통해서만 전원이 공급된다.

이용 가능한 직렬콘덴서의 보호기능은 다음과 같다.

- 콘덴서 불평형 보호
- 콘덴서 과부하 보호
- 선로전류 감사
- 플랫폼 섬락 보호
- MOV 과부하보호
- MOV 고장 보호
- 전극 불일치 보호
- 우회스위치 고장 보호
- CapThor 보호
- 콘덴서 방전 기능

E. 기계적 설계

직렬콘덴서는 직렬콘덴서가 설치된 송전계통과 동일한 전압에서 동작하기 때문에 완전히 절연된 강구조 플랫폼에 설치된다. 우회개폐기만 대지에 직접 설치된다. 그림 10은 한 상의 직렬콘덴서 배치를 보여준다.



[그림 12] 구역트립시험 결과

선로보호장치에서 개시된다. 원격통신 지연 시간은 우회 조치가 항상 고장전류차단 이전에 가능하도록 터미널 차단기 속도 및 FPD 제어회로 지연 시간을 조절한다.

철저한 구역트립시험을 통해 설계의 유효성을 입증하고 시험결과의 한 예를 그림 12에 나타낸다. 원격 우회 명령 신호의 입수 즉시 6ms이내에 FPD가 3상 모두를 우회 조치하였고 터미널 차단기가 전류를 차단하기에 충분한 시간 여유도가 달성되었음을 알 수 있다. 실제 고장을 통해 설계의 추가 입증에 기대된다.

참고문헌

- [1] R. Grunbaum and J. Samuelsson, "Series capacitors facilitate long distance AC power transmission," in Proc. 2005 IEEE PowerTech, St. Petersburg, Russia
- [2] "Series Capacitors for increased power transmission capacity in the Finnish 400 kV grid," ABB AB, Vasteras, Sweden, Application Note A02-0222 E, Nov. 2010.
- [3] R. Grunbaum, J. Redlund, and L. P. Rollin, "Safety in speed - ABB's Fast Protective Device scheme for series capacitors," ABB Review, No.03, pp. 46-49, 2007.
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl, High Voltage Engineering-Fundamentals, Oxford: Pergamon Press, 1984, reprint 2004.
- [5] P.M. Anderson, R.G. Farmer, Series Compensation of Power Systems, PBLSH! Inc., CA, USA, 1996, pp. 370-381.

VII. 결론

각각 750 Mvar 정격의 2개의 직렬콘덴서를 캐나다 온타리오의 Hammer-Essa 500kV 전력연계선에 설치하였다. 직렬콘덴서의 위치는 연계선의 송전 안정도를 증진시킬 목적으로 대략 연계선의 중간 지점에 설치하였다. 결과적으로, 연계선을 통한 송전용량이 증가하였으며 그에 따라 안정된 조건 하에서 송전전력을 증가시키기 위한 송전선로의 추가 설치 필요성이 감소 또는 연기되었다.

직렬콘덴서와 함께 Nobel 고속보호장치를 포함시켜 종래에 보호장치로 사용되었던 스파크갭의 경우와 비교하여 과도 송전망 조건하에서 직렬콘덴서의 특성이 개선되었을 뿐만 아니라 직렬보상선로의 회로차단기에 인가되는 과도회복 전압도 완화되었다. KEA