

송전계통의 대용량 전력수송을 위한 신기술설비 적용방안 연구

장병훈, 이원교, 김수열, 원영진, 추진부
한국전력공사

A study on the application of power electronic devices for bulk power transmission

B.H. Chang, W.K. Lee, S.Y. Kim, Y.J. Won, J.B. Choo
Korea Electric Power Corporation

Abstract - 국내 전력수요의 지속적인 증대로 인한 원거리의 발전단지의 대용량화에 따라 대용량 전력을 안정적으로 공급하기 위한 전력변환기술 수요가 증대될 것으로 전망된다. 또한, 규제완화와 민영화로 대표되는 전력산업의 환경변화에 능동적으로 대응할 수 있는 새로운 형태의 대용량 전력수송 기술 개발과 지역계통간의 연계방안의 확립은 국가 전력 부문 경쟁력 강화의 핵심요인으로 등장하고 있다. 최근 무효전력의 별도 보상이 필요 없는 전력변환방식으로 전압형 인버터방식이 개발되어 상용화되고 있으며, 다양한 형태로 전력계통에 적용되고 있다.

본 논문에서는 신기술 FACTS 설비를 소개하고, VSC 전력변환 기술을 이용한 FACTS 설비의 전력계통 적용 시 계통운용 측면에서 필요한 특성을 분석하기 위한 계통해석 방안에 대해 기술하였다. 또한, 풍력단지 및 섬지역에 대한 계통연계의 해의 주요 적용 사례를 분석하고, 국내계통에 대해 수도권-충남 지역간 북상조류 전송선로 보강 방안 검토사례를 발표하였다.

1. 서 론

트랜지스터가 전자회로의 기본 소자라고 한다면, 사이리스터는 전력전자회로의 기본 소자라고 할 수 있다. 이 사이리스터 등의 전력용 반도체 소자를 활용하여 전력계통 파라미터를 속응성 있게 제어하는 것이 유연송전시스템(FACTS:Flexible AC Transmission System) 기술이다. SVC가 GE, Westinghouse와 EPRI 공동출자로 1970년대에 입증된 이래, 최근 반도체 소자 기술 발달로 전압원 컨버터 FACTS 기술이 계통에 적용되어 보다 효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용이 가능하게 되었다.

FACTS기술은 기존 전력설비의 이용률 향상을 통하여 전력계통의 송전제약을 해결하는 수단으로 TCSC, STATCOM, SSSC, UPFC 등 직렬형 보상기기가 활용되고 있으며, 여기에 대용량 VSC 기술이 적용되고 있다. 또한 21세기 환경문제에 대한 대처방안의 하나로서 분산전원 계통연계가 활발히 진행되고 있으며, 분산전원의 특성상 전기품질 유지를 위한 변환설비로서 VSC 방식의 적용으로서 현재 실용화 단계에 들어서고 있다.

또한 대규모 전력계통 연계를 위한 수단으로 수 GW급의 전류원 HVDC (High Voltage Direct Current)가 사용되고 있으나 향후 전압원방식인 VSC (Voltage Sourced Converter)를 적용할 것으로 예상된다.

FACTS 연구는 적용목적에 따라 새로운 형태의 기기가 계속 개발되고 있으며, FACTS의 계통에 미치는 영향, 즉 조류제어, 과도안정도 개선, 미소신호 안정도 개선, 동적동요 저감 등이 주로 연구되고 있다. 이러한 FACTS 기기들은 계통내에서 협조제어를 통하여 최적 조류제어 혹은 계통의 동적동요 저감을 기여할 수 있으므로, EMS(Energy Management System)와 FACTS 영

향에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

2. 본 론

2.1 FACTS 소개

FACTS는 전력용반도체를 이용한 제어기술을 전력계통에 응용함으로써 전력수송설비의 기능을 고도화하고 설비 이용률의 극대화를 이룩하기 위한 새로운 개념의 전력시스템이라고 정의할 수 있다. 이와 같이 종래의 기계식 스위치를 이용한 제어장치 대신에 전력용반도체를 이용한 제어장치 및 대용량 인버터와 같은 전력변환장치를 이용함으로써, 기계식제어장치에 의존하는 종래의 전력시스템의 한계의 극복이 가능하며, 특히, 환경문제 등으로 인하여 송전선로 건설부지 확보난이 심각해짐에 따라 송전선로 건설이 점점 더 곤란해지고 있어, FACTS 기기는 장기적인 전력에너지 수송대책이라는 측면에서 매우 유용한 수단으로 평가받고 있다.

표 1은 대표적인 FACTS기기를 나타내며 기계적스위치를 사이리스터 스위치로 대체하는 방식인 I세대 FACTS 설비와 전압원 컨버터 방식을 사용하는 II세대 FACTS 설비를 보여준다.

표 1 대표적인 FACTS 기기

구분	FACTS 기기명	특징 및기능
I 세대	SVC - 병렬형 FACTS (Static Var Compensator)	전압유지 안정도 향상
	TCSC - 직렬형 FACTS (Thyristor Controlled Series Capacitor)	선로 Impedance 제어 전력조류 제어 안정도 향상
II 세대	STATCOM - 병렬형 FACTS (STATic synchronous COMPensator)	전압유지 안정도 향상
	SSSC - 직렬형 FACTS (Static Synchro. Series Compensator)	전력조류 제어 선로 Impedance 제어 안정도 향상
	UPFC - 직/병렬형 FACTS (Unified Power Flow Controller)	전압크기/위상각 제어 안정도 향상 전력조류 제어

이외 전압원 컨버터 FACTS 기기로서 2대의 SSSC를 조합한 IPFC(Interline Power Flow Controller), 2대의 STATCOM을 결합한 Back-To-Back STATCOM, 직렬 및 병렬인버터의 다양한 조합을 통해 다양한 운전모드를 구성하는 CSC(Convertible Static Compensator)가 있다.

2.2 신기술 FACTS

2.2.1 CAPS(CAPacitor series group Shorting)

CAPS는 새로운 형식의 저가 무효전력공급설비로 개념은 그림 1과 같으며, Shorting Switch는 사이리스터로 제어된다.

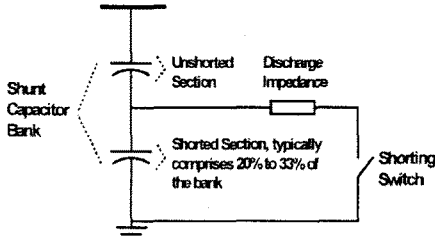


그림 1 CAPS 개념도

Shorting Switch를 투입하므로 커패시터 뱅크의 리액턴스를 감소시켜, 계통에 공급되는 무효전력을 증가시킨다. 공급되는 무효전력량 및 지속시간은 CAPS 파라미터 설계 값에 따라 정해지며, Shorted Condition에서는 연속운전, 커패시터의 한시-과전압 조건으로 설계된다.

CAPS 잇점은 다음과 같다.

- local control에 의한 제어 가능
 - 저가의 FACTS 설비
 - 저가의 설치비
 - 적은 설치면적
 - 저가의 운영 및 유지보수비
 - 실증되고, 상업화된 소자를 활용하여 구성됨.
- CAPS에 대한 연구결과를 통해 필요한 무효전력을 공급하기 위한 새로운 커패시터 뱅크를 추가하는 비용 대비 30-60%의 비용 절감이 있다.

2.2.2 TPSC(Thyristor Protected Series Compensation)

직렬보상설비인 FSC(Fixed Series Compensation, 직렬커패시터+바이패스 MOV 구조)의 MOV를 Thyristor로 대체한 것이다. MOV는 열에너지 냉각에 장시간 소요되어 보상 효과가 저하되지만, Thyristor는 냉각효과가 좋아 2차 사고시에도 곧바로 보상 가능하다. 현재 Southern California Grid의 Vincent S/S에 1999, 2000년에 3대를 설치하였다.

2.2.3 SCCL(Short Circuit Current Limiter)

상시 LC 제로 임피던스로 동작하다가, 사고시에는 수 ms내에 커패시터를 바이패스 동작시켜 리액터로 고장전류를 감소시킬 수 있으며, TPSC와 Reactor의 조합으로 구성되어 있다. Bus coupler로 적용 시, 고장전류 저감하여 차단기 업그레이드 문제를 해소할 수 있지만 현재까지 적용 사례는 없다.

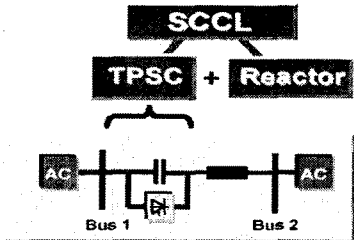


그림 2 SCCL(Short Circuit Current Limiter) 구성

2.2.4 ETO STATCOM

컨버터형 제어설비는 송전계통의 security 및 stability를 유지하면서 50%정도까지 전력전송 능력을 향상시킬 수 있음이 여러 사례를 통해 나타났다. 이러한 잠재적인 잇점으로 인하여, ETO(Emitter Turn-Off) 싸이리스터와 CMC(Cascade Multilevel Converter)기술이 North

Caroline 주립대 SPEC(Semiconductor Power Electronics Center)에서 EPRI, TVA, DOE 지원으로 개발되고 있다.

이 프로젝트의 목적은 다음과 같다.

- 새로운 전력전자 소자를 활용한 컨버터형 제어설비의 구현 및 현장 실증
- 혁신적인 제어기 설계 개념 도입
- 컨버터형 제어설비에 대한 다양성, 신뢰도, 기능성 향상

2.2.5 MCR based SVC

자기적으로 제어되는 병렬 리액티브인 MCR[Magnetically Controlled Reactor]은 새로운 형태의 리액터로, 이전 시스템에 적용되던 리액터의 10배에 해당하는 자속능력을 갖는 코어로 제작된다. 현재 러시아에서 SVC의 TCR[Thyristor Controlled Reactor]을 MCR로 대체하여 구현한 바 있으며, MCR의 장점은 경제성, 에너지 효율과 높은 신뢰성이다.

2.3 VSC FACTS 설비 계통해석방안

FACTS 제어기는 주로 다음의 두가지 방법으로 모의된다.

2.3.1 전력계통 축약 모의

3상 계통으로 구현되는 상세한 계산을 통해 구현되는 모의로, FACTS 설비의 변압기, 컨버터, 커패시터 등이 모두 표현된다. 제어알고리즘도 컨버터의 점호 펄스까지 상세하게 구현된다. 이 방법의 목적은 정상상태와 과도 상태 및 설비가 받는 스트레스, 고조파 그리고 FACTS 설비와 계통간의 상호작용 등을 조사하기 위한 것이다. 이 방법에서 계통은 적정 등가회로로 모의된다.

2.3.2 FACTS 설비 축약 모의

조류, 과도 안정도 및 특성치계산을 포함하여 정상상태 및 안정도 분석을 위한 모의 방법으로, 정격주파수보다 훨씬 작은 주파수 특성에 대한 응답특성을 분석하기 위한 방법이다. FACTS 제어기는 간략 모델로 모의되며, 전력계통은 발전기, 선로, 부하 등 충분히 표현되어 모의된다.

싸이리스터 기반의 FACTS 설비는 커패시터나 인덕터를 싸이리스터를 통해 제어하므로, 제어 가능한 서셉턴스나 임피던스로 모델링이 가능하다. 서셉턴스나 임피던스 값은 제어기 출력에 의해 결정되며, SVC와 TCSC가 싸이리스터 기반의 FACTS이다. 이에 반해 VSC 기반의 FACTS설비는 전압원 혹은 전류원으로 모델링된다. 다음은 대표적인 VSC FACTS설비에 대한 해석방법이다.

2.3.2.1 STATCOM

STATCOM은 모선에 병렬로 연계되는 FACTS설비로 전압원이 모선과 병렬연결되어, 계통과 무효전류를 수수하게 된다 따라서 STATCOM은 병렬 전류원으로 모의가 가능하며, 이의 동특성을 분석하기 위해서는 제어알고리즘을 갖는 전류원으로 모의한다.

2.3.2.2 SSSC

SSSC는 송전선로에 직렬로 연계되는 FACTS설비로 전압원이 선로에 주입되기 때문에 선로전류에 90도 진상상의 위상을 갖는 전압원으로 모델링된다.

2.3.2.3 UPFC

UPFC는 병렬 인버터와 직렬 인버터를 동시에 갖는 FACTS 설비로, 병렬인버터는 병렬전류원으로, 직렬인버터는 직렬전압원으로 모델링된다. UPFC의 주목적은 조류제어이므로, 주제어권은 직렬인버터가 갖게 됨으로, 4상한의 위상을 갖는 직렬전압원에 따라 필요한 유효전력을 병렬전류원이 담당하게 된다. 또한 병렬인버터는 등

시에 무효전력공급원이 되므로, 전압보상용 병렬전류원으로 모델링된다. 따라서 UPFC 모델에서 직렬인버터는 직렬전압원, 병렬인버터는 유효전력을 공급하는 병렬전류원 및 무효전력을 공급하는 병렬전류원의 두가지로 모델링된다.

2.4 계통연계 사례

반도체소자의 발달로 VSC(Voltage Source Converter, 전압원컨버터)의 대용량화가 가능해짐에 따라 VSC가 FACTS 및 HVDC에 응용되고 있다. 기존 전류원 HVDC에서는 전송전력의 제어를 위해서는 위상각 제어가 필요하며, 이에 필요한 무효전력을 외부 커패시터 뱅크를 통해 공급하였으나, 전압원 HVDC나 BTB STATCOM 설비는 스위칭소자의 PWM방식제어로 무효전력이 필요치 않으며, 전압극성에 변화가 없어 multi-terminal 구성이 용이하다. 따라서 향후, VSC의 응용은 계속 확대되어갈 것으로 전망되며, 현재 소규모 혹은 풍력단지의 계통연계에 VSC가 적용되고 있다.

2.4.1 VSC 해외 적용사례

현재까지 대부분의 친환경적 에너지원은 수력이었다. 발전과 거의 그 역사를 같이 하고 있는 수력은 대부분 발전과 소비가 근접하게 위치하고 있었다. 하지만 향후 중국 중부, 브라질 아마존강, 인도 아삼, 아프리카 콩고강의 수력에너지는 전기에너지 수송을 위해 HVDC가 적용될 것으로 전망된다. 태양에너지를 이용한 발전은 현재까지 소규모로 이뤄지고 있지만, 매년 증가추이이며, solar panel이 효율과 가격경쟁력을 갖게 되면 그 기여도가 증가할 것이다. 특히 사막의 태양에너지를 수송하고자 수송하는데도 VSC HVDC가 적용될 것으로 전망된다. 풍력은 현재까지 대부분 소규모로 이뤄져 계통에 미치는 영향이 적어 AC 계통으로 연계가 되어왔으나, 친환경적인 에너지원으로서의 계통에서 차지하는 비율이 증가하고, 또 규모도 증가됨으로 대부분 해안가에 위치하게 되어, VSC HVDC로 계통연계가 경제적이다. AEP CPL(Central Power Light Company) EaglePass VSC BTB는 36MW 전력전송이 가능하며, 전압제어, 유효전력제어, 각각 독립적인 STATCOM 제어모드가 있다. EaglePass 전압제어가 주 목적이며, 유효전력제어 모드에서도 EaglePass 계통이 불안정하면, 전압제어로 동작하게 된다.

2.4.1.1 Gotland 풍력 발전 계통연계

스웨덴 Gotland섬은 1954년 세계 최초로 HVDC를 통해 본토에서 전력을 수전하였다. 하지만 Gotland 섬의 남부 풍력에너지를 개발하여 섬의 중심부로 전송하므로써 자체수요를 초과하여 이제는 본토로 역수출하고 있다.

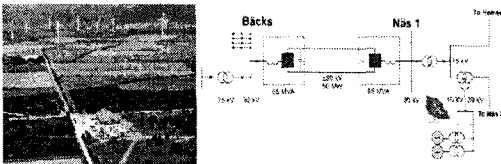


그림 3 Gotland 풍력 계통연계 구성

2.4.1.2 Tjaereborg 풍력 발전

Tjaereborg 풍력단지는 덴마크 서부에 위치하고 있으며, 8MW의 DC feeder가 설치되어 있다. Tjaereborg 풍력단지에 VSC HVDC를 설치하므로 전기품질은 물론 전체계통의 안정도 증진에 기여하고 있다.

2.4.2 국내 계통연계 검토 사례

수도권의 안정적인 전력공급을 위한 충남-수도권간

계통연계방안 결정을 위해 연계 가능 시나리오별 기술성 및 경제성평가를 통해 경제성을 검토하였다. 계통은 2013, 2017, 2020년 Peak 계통을 대상으로 하였으며, 전 T/P-영흥T/P, INI-영흥T/P, INI-평택T/P 시나리오별 AC 및 DC 연계를 검토하였다. 먼저 고장전류 검토로 차단용량 초과개소를 조사하여 고장전류 저감 대책을 수립하였으며, P-V 해석을 통한 유효전력여유, i-V 해석을 통한 수도권 용통전력여유 분석을 통해 혼잡비용 절감효과를 분석하였다.

2.5 향후 전망

SVC(Static VAR Compensator) 기술이 1970년대에 입증된 이래, GTO 기반의 컨버터형 FACTS 기기인 STATCOM이 TVA Sullivan S/S에 Siemens, EPRI 공동으로 1995년에 설치되었다. 현재 가장 많은 적용 연구가 진행된 컨버터형 FACTS 설비인 STATCOM이며, SVC 대비하여 설치 면적 및 기술의 진보에 따른 전력용 반도체 가격 하락에 따른 STATCOM의 확대 적용이 예상된다. 하지만 SVC 적용의 경우 여전히 증가추세에 있으며, 당분간 SVC와 STATCOM이 계속 경쟁할 것으로 보인다. 향후 TSC 및 STATCOM을 조합한 Hybrid STATCOM의 적용도 경쟁력 있는 좋은 대안으로 생각되며, 직렬FACTS 설비로서 TCSC가 대표적이다. SCCL을 Bus coupler로 적용시, 고장전류 저감하여 차단기 업그레이드 문제를 해소할 수 있지만 현재까지 적용 사례는 없고, SCCL을 구성하는 TPSC는 확대 적용되고 있는 추세이다. 국내의 경우, 고장전류가 증대되고 있는 점을 감안하면, 직렬 FACTS 설비로서 고장전류를 저감하는 SCCL의 적용을 고려해 볼 수 있다.

3. 결 론

1999년 서대구 SVC 및 2005년 UPFC를 설치 운영한 이래, 한전에서는 산자부 국가전략과제 및 전력IT 사업으로 대용량 전력수송 기술 및 IT 기반의 FACTS 기술 개발을 위해 국내 제작사인 (주)효성과 연구개발에 투자하고 있다. FACTS 설비는 적용 목적에 따라 다양하게 개발되어 설치되므로, FACTS 설비에 대한 기반기술이 확보되어 향후 다 FACTS 설비 응용개발이 가능하여야 한다. 한국전력공사는 전력IT사업을 통해 100MVA STATCOM을 수도권계통에 2008년 적용예정이며, 20MVA BTB STATCOM은 풍력단지의 계통연계에도 활용될 수 있는 규모로, 향후 고장실증시험장의 실증시험을 통해 계통연계기술을 개발하고 동북아 계통연계를 대비하여 국가 경쟁력을 확보할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Thomas F. Garrity, "Shaping the Future of Global Energy Delivery", IEEE Power & Energy Magazine, Sep/Oct. 26, 2003
- [2] Dussan Povh, "Modeling of FACTS in Power System Studies", IEEE, 1435-1439, 2000
- [3] Gunnar Asplund, "Application of HVDC Light to Power System Enhancement", IEEE, 2498-2503, 2000
- [4] Gunnar Asplund, "Sustainable energy systems with HVD C transmission", IEEE, 1-5, 2004
- [5] 전력계통해석센터, "수도권 공급신뢰도 향상을 위한 충남-수도권간 계통연계방안 연구", 한전 최종보고서