

약한 AC 계통에서 동기조상기용 여자 시스템 특성에 따른 HVDC 과도 특성

論 文
49B-6-5

Dynamic Performance of HVDC According to Excitation System Characteristics of Synchronous Compensator in a Weak AC System

金 燦 起* · 金 正 夫** · 沈 應 輔***
(Chan-Ki Kim · Jeong-Boo Kim · Eung-Bo Shim)

Abstract - This paper analyses the dynamic performance of HVDC System connected to a weak AC system for various exciter characteristics of synchronous machines connected at the converter bus. Conventionally capacitors are used to supply reactive power requirement at a strong converter bus. But the installation of synchronous machine is essential in a isolated weak network to re-start after a shutdown of HVDC and to increase system strength. The dynamic performance of a synchronous machine depends on the characteristics depends of its exciter. In this paper, several exciter types are used to investigate their effect on the dynamic performance of the HVDC system and modifications to standard exciter topologies are suggested to mitigate observed problems.

Key Words : HVDC, Synchronous Compensator(S.C.), Excitation System, EMTDC

1. 서 론

HVDC(High Voltage DC Transmission) 시스템은 장거리 교류 송전선보다 저렴한 비용으로 장거리 대용량 전력 전송을 할 수 있고, 교류 계통주파수나 위상이 다른 두 지역의 연계에도 이용되어지며 최근에는 계통의 동요를 억제시키기 위해 PSS (Power System Stabilizer)대용으로도 이용되어지고 있다.

이러한 HVDC 시스템은 변환소자로서 싸이리스터를 이용하기 때문에 HVDC 변환기(정류기와 인버터)는 DC 전력 전송량(유효분 전류)의 대략 60%에 해당하는 지상 무효전류를 교류계통으로부터 흡수한다. 이러한 무효전력의 소비는 HVDC 시스템 용량이 커짐에 따라 더 많은 문제를 유발하는데, 무효전력을 보상하기 위해서 HVDC 연결 단에 콘덴서, 동기조상기(Synchronous Machine), 정지형 무효 전력 보상기 (SVC : Static Var Compensator) 그리고 STACON (STatic CONDensor)과 같은 무효전력 보상장치의 설치를 해야하는 문제와 콘덴서를 설치함에 따라 계통에서 생길 수 있는 과전압 문제 그리고 계통의 인덕턴스와 HVDC 시스템에 설치된 콘덴서사이에서 발생하는 고조파 공진 문제가 생길 수 있다.

이러한 문제는 강한 AC계통에 연계된 HVDC시스템에서

는 AC 계통이 어느 정도 감당할 수 있으나 약한 AC 계통을 연계하는 HVDC 시스템에서는 필할 수 없는 문제이다. 이러한 문제는 그 동안 많이 연구자들에 의해서 연구되어 왔고, IEEE에서는 1986년에 "DC Transmission Terminating at Low Short Circuit Ratio Locations" 논문에서 약한 계통에 HVDC를 연계하는 경우에 고려해야 할 문제점을 검토하였다.

본 논문은 HVDC 시스템에서 생길 수 있는 문제점 중 약한 AC 계통에서 무효전력을 공급하기 위해 AC 계통에 설치되어 있는 동기조상기의 특성에 따른 HVDC 시스템의 특성을 분석하는 것이 주된 논문의 핵심이다.

Nyati 등은 80년대에 HVDC가 연계된 AC 계통에 무효전력을 보상하기 위해서 정지형 무효전력 보상기(SVC)가 동기조상기보다 매우 빠른 계통응답을 가지기 때문에 더 유용하다고 주장하였으나, 90년대에 Gole 등은 전력전자의 발달로 동기조상기의 계통응답이 빠르고, SVC가 초기 제어시 제어되어 않는 과전압을 유발하기 때문에 SVC와 동기조상기를 결합한 무효전력 보상 장치를 계통에 설치하는 것이 최선의 선택이라고 주장하였다[1].

그러나, 위에서 논한 내용은 동기조상기를 AC 계통에 설치하는 경우에 수반되는 문제를 논한 것이 아니라, 계통의 무효전력 보상측면에서만 고려되었기 때문에 HVDC 시스템이 연계된 약한 계통에서 유발될 수 있는 문제점을 고려하지는 않았다. 예를 들어 약한 계통에서, 특히, 수전단측에 발전력이 없는, 즉, 관성 모멘트가 0인 경우에는 SVC나 STACON과 같은 설비는 수전단측에서 재기동(Black Start)을 할 수 없기 때문에 동기조상기가 유일한 대안이다. 물론, IGBT를 이용한 전압원 방식의 Light HVDC가 대안으로 떠

* 正 會 員 : 電力研究院 先任 研究員 · 工博
** 正 會 員 : 電力研究院 首席 研究員 · 工博
*** 正 會 員 : 電力研究院 責任 研究員
接受日字 : 1999年 11月 23日
最終完了 : 2000年 4月 18日

오르고 있지만 경제적이거나 전력 용량 관점에서 보면 경제적 일 수는 없다.

이러한 동기조상기는 발전기의 일종으로써 동기조상기의 전압을 제어하는(동기조상기의 전압조정은 최종적으로 계통의 무효전력을 제어) AVR(Automatic Voltage Regulator)의 특성이 계통에 미치는 영향이 많음에도 불구하고 HVDC 시스템에 연결된 경우에 수반되는 문제점에 대해서는 많은 연구가 없었다. 대규모 계통에서는 수십 또는 수 백기의 발전기(동기조상기)가 계통에 연결되어 있기 때문에 각각의 발전기나 동기조상기의 특성이 계통에 미치는 영향이 확연히 드러나지 않으나 HVDC 시스템이 연결된 약한 계통에서는 무효 전력 보상용 동기조상기의 특성이 HVDC 시스템에 중대한 영향을 미치며 심한 경우에는 계통붕괴로 이어질 수 있다. 이러한 이유는 대규모 계통에서는 계통의 전체 용량에 비하여 각각의 발전기나 동기조상기의 용량이 상대적으로 아주 작기 때문에 각각의 발전기나 동기조상기의 특성이 그다지 중요하지 않으나 약한 계통에서는 계통 전체에 비하여 동기조상기의 용량이 상대적으로 크기 때문에 동기조상기의 특성이나 제어 개인의 영향이 계통에 중대한 영향을 미친다. 이러한 영향은 HVDC가 연결된 계통이 아니더라도 섬과 같이 작은 계통에서는 심각하게 문제가 제기 될 수 있는 것이다. 이러한 문제 때문에 안정한 계통 전원을 필요로 하는 곳에서는 하나의 대용량 발전기를 계통에 연결하기보다는 소 용량의 발전기를 여러 개 분산하여 계통에 연결하여 사용하는 것이 현실이다.

본 논문에서는 HVDC에 연결되는 동기조상기의 특성을 분석하고 동기조상기를 HVDC시스템에 연결한 경우에 생길 수 있는 문제점을 도출하여 해결책을 제시하였다. HVDC가 연계된 약한 AC 계통에서 동기조상기에 의해서 발생하는 문제점과 해결책은 3장에서 자세히 논하기로 하겠다.

그리고 본 논문의 연구 분석은 EMTDC프로그램을 이용하여 시간영역 디지털 시뮬레이션으로 수행하였으며 계통 모의는 수정된 CIGRE 모델을 이용하였다.

2. 약한 시스템에서 발생하는 문제

2.1. 단락 용량과 유효 단락 용량의 정의

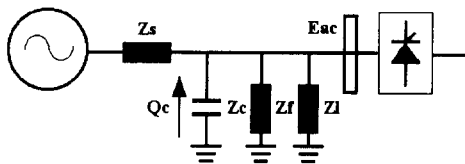


그림 1 컨버터와 AC 시스템
Fig. 1 Converter and AC system

HVDC 시스템의 특성은 연계된 AC계통의 테브난 임피던스에 의해 결정된다. 만일 테브난 임피던스가 작으면, 교류 계통의 전압 변동율(파전압의 감소)은 매우 작고 정류실패도 거의 일으키지 않는다. 만일 이 임피던스가 크면, 고조파 공진이나 안정도 문제를 일으킬수 있다. 이 임피던스와 관

계된 AC계통의 강도는 단락비(SCR)로 표현되는데, 이것은 AC계통의 단락 MVA의 비율로서 정의된다. 단락 MVA는 식 (1)의 단락 레벨(SCL)로 주어진다[2][3].

$$SCL = \frac{E_{ac}^2}{Z_{ac}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} SCR &= \frac{\text{Short Circuit Level, SCL(MVA)}}{\text{DC Power, } P_d(\text{MW})} \\ &= \frac{MVA(SCL)}{P_d} = \frac{E_{ac}^2}{P_d \cdot Z_{ac}} \\ &= \frac{1}{Z_{ac}} Z_{base} = \left(\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_l} \right) Z_{base} \end{aligned} \quad (2)$$

SCR은 상대적인 개념으로써 HVDC 시스템의 정격 DC 전력이 1/2로 줄어들면 SCR은 2배 증가된다고 볼 수 있다. SCR은 Z_{ac} 의 역수에 비례하는 complex number이다. 만일 Z_{ac} 가 매우 높은 유도성분이면 SCR은 거의 imaginary이다. 그러므로 계통의 특성을 파악하고자 할 때 SCR의 위상은 무시되며 단지 그 크기만이 고려된다.

실제로 많은 경우에 계통의 단락비를 검토하는데 있어서 유효단락비(ESCR)가 사용된다. 유효 단락비는 HVDC 시스템을 설치하는데 있어서 필수 적으로 추가되어지는 병렬 콘덴서와 필터를 테브난 등가 임피던스에 포함시킨 것이다. 일반적으로 AC계통은 인덕턴스 성분으로 이루어져 있기 때문에 콘덴서를 이러한 계통에 추가하면 인덕턴스와 콘덴서가 상쇄되어 계통이 약화되는 것처럼 보인다. 유효단락비(ESCR)는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} Q_c &= \frac{E_{ac}^2}{\frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_c}} \\ ESCR &= \frac{SCL - Q_c}{P_d} \\ &= \frac{1}{Z_c} Z_{base} \\ &= \left(\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_l} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_c} \right) Z_{base} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 보는바와 같이 ESCR은 교류 필터에 의한 무효전력을 고려하므로, ESCR의 크기는 SCR보다 작아진다. HVDC 계통에 연결된 교류 계통의 인덕턴스(L)와 무효전력 소비를 보상하기 위한 콘덴서(C)을 식(4) 및 (5)에서 계산하였으며, 식(6)은 인덕턴스와 콘덴서사이의 공진 주파수를 보여준다.

$$Q_c \approx 0.6P_d = \omega_o E_{ac}^2 C, \quad C = \frac{0.6 \cdot P_d}{\omega_o \cdot E_{ac}^2} \quad (4)$$

$$L = \frac{Z_{ac}}{\omega_o} = \frac{E_{ac}^2}{\omega_o \cdot (SCR \cdot P_d)} \quad (5)$$

$$\omega_o (\text{Resonant freq.}) = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_o \sqrt{\frac{SCR}{0.6}} \quad (6)$$

$$\frac{\omega_r}{\omega_o} = \sqrt{\frac{SCR}{0.6}} \approx 2 \cdot \omega_o. \quad (\text{If SCR is } 2.5) \quad (7)$$

식(7)에서 보는 바와 같이, 만일 SCR이 2.5이면 교류 계통의 공진 주파수는 기본 주파수의 2배가 된다. 교류선로 고장에 의한 HVDC 계통의 고조파 불안정은 이러한 공진 주파수에 의해 일어난다.

2.2. 동기조상기를 HVDC 링크단에 연결할 경우 발생하는 문제

HVDC 계통이 약한 교류계통에 연계될 때 과전압 문제, 전압 안정도 및 고조파 공진과 같은 문제들이 일어난다. 첫째, 과전압은 DC 전력 전송을 갑자기 차단할 때와 콘덴서나 필터를 스위칭 할 때 발생한다. 둘째, DC 송전선의 수전단에서 HVDC 시스템이, 통상 DC 전력의 약 60 퍼센트의 실질적인 무효전력을 흡수하므로, 전력의 변화는 점진적으로 전압 안정도를 저하시킨다. 셋째, 대부분의 고조파 공진 문제는 낮은 차수에서 교류 정전용량, 필터 및 교류계통 임피던스 사이의 고조파 공진에 의해 일어난다. 이러한 문제들에서 고조파를 줄이기 위한 12펄스 컨버터의 사용과 갑작스런 전류의 변화를 줄이기 위해 HVDC에 내장된 VDCL (Voltage Dependant Current Limit)이용은 본 연구범위에서 제외하고 본 논문에서는 동기조상기에 관련된 시스템의 과전압과 무효전력 문제만을 고려하였다.

그림 2는 동기조상기의 여러 가지 결선을 보여준다. 그림 2 (a)에서 보여준 결선방법은 HVDC 링크 단에 동기조상기를 연결한 경우를 보여 주고 있는 경우이며 그림 2(b)의 결선방법은 철심 옆의 3차권선에 연결되거나 주권선 사이의 3차 권선에 연결된 경우이다. 이러한 경우는 계통에 병렬로 인덕턴스를 연결한 경우에 해당되기 때문에 계통 전체의 SCR이 증가하는 효과가 있으며 동기조상기가 회전체 기기이기 때문에 계통의 관성 모멘트의 값을 증가 시켜 주는 역할을 한다. 참고적으로 그림 2 (b)의 결선 방법은 동기조상기를 HVDC용 변압기의 주권선 사이에 있는 3차권선에 연결하는 방법으로 동기조상기의 용량은 줄일 수 있으나 무효전력조정 범위가 제한된다.

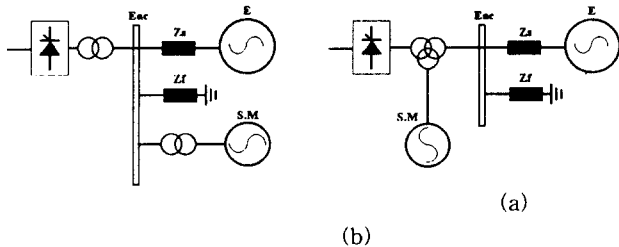


그림 2 동기조상기의 계통 연결방법
Fig. 2 Various connections for synchronous machine

보편적으로 동기조상기와 SVC 그리고 STACON은 과도 상태에서 무효전력을 발생 또는 흡수하여 과전압이나 저전압을 방지하는 보상 장치로써 HVDC 수전단에 설치되어 있

는 콘덴서와 함께 사용되어진다. 즉, 동기조상기의 목적은 HVDC의 부하가 증가함에 따라 무효전력을 보상하기 위해서 콘덴서 뱅크가 스위칭을 할 때 콘덴서로 보상하지 못하는 무효전력을 공급하거나 콘덴서에 의해 너무 많이 공급된 무효전력을 흡수시킴으로써 계통의 AC전압을 일정하게 유지 시켜 주는 역할을 한다. 그리고 갑작스런 HVDC 시스템의 DC 전력이 중단되는 경우에 HVDC 수 전단에 설치되어 있는 콘덴서 뱅크에 의해 AC 계통에는 과전압이 발생할 때 동기조상기는 이러한 AC 계통의 과 전압을 억제해 주는 역할을 하기 때문에 엄밀히 말해 동기조상기의 용도는 “과도 무효전력 보상장치”라 부를 수 있다.

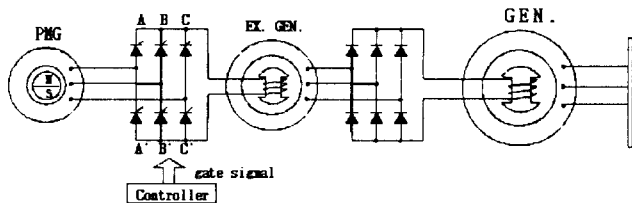
이러한 동기조상기는 발전기의 일종으로써 유효전력을 제어하는 터빈 제어기와 무효 전력을 제어하는 전압제어기를 가지고 있다. 동기조상기에 있는 터빈제어기는 시충전을 제외하고는 거의 운전되지 않기 때문에 동기조상기의 주된 특성은 전압제어기에 의해서 결정된다. 이러한 전압제어기는 AVR (Automatic Voltage Regulator)이나, 여자제어 시스템이라고도 불리운다. 이러한 여자제어 시스템은 발전기 출력단에서 전원을 공급받는 정지형 여자 시스템과 별도의 AC 회전기(여작용 발전기)를 이용하여 발전기 계자에 전압을 공급하는 방식으로 구분되어 질 수 있는데 정지형 여자 시스템은 회전기를 사용하지 않기 때문에 속응성이 빠르고 유지 보수가 쉽다는 장점이 있음에도 불구하고 자신이 제어하는 발전기의 출력 단에서 전원을 공급받기 때문에 약한 계통에서는 전압이 동요하고 제어 범위가 줄어드는 단점이 있다. 이 때문에 HVDC 시스템과 연결된 약한 계통에서는 많이 사용하고 있지는 않다. 반면에 수십 년 전부터 사용되어져 온 AC 회전형 여자 시스템은 발전기의 계자 전압을 AC 회전 기기를 이용하기 때문에 속응성이 떨어지는 단점이 있음에도 불구하고 전원이 안정적이고 제어 범위가 넓다는 장점 때문에 기저부하로 사용되는 대용량 발전기나 약한 계통에 많이 이용되고 있다. 약한 계통에서 동기조상기용 여자 시스템을 정지형으로 한 경우와 회전형으로 한 경우의 문제는 4장에서 시뮬레이션을 통하여 확인될 것이며 다음 장에서는 각각의 여자 시스템의 특징에 대하여 좀 더 상세하게 논하기로 하겠다.

3. 여자 시스템 검토

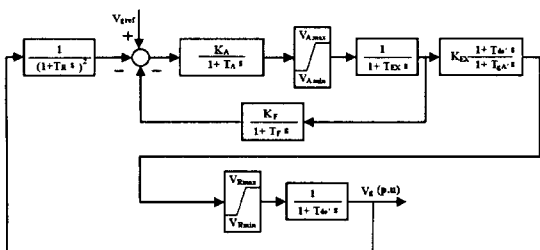
IEEE는 현재 사용되는 여자 시스템을 12가지의 모델로 분류하였다. 그러나 계통특성의 관점에서 보면 여자 시스템은 크게 3가지 형태로 분류되는데, 그것은 직류형, 교류형 및 정지형이다. 그러나, 직류형은 현재 서서히 사라지고 있으므로, 본 논문에서는 교류형과 정지형만 다루었다. 또한 여자 시스템의 계인은 정상상태 계인과 과도 상태 계인으로 분류할 수 있는데, 발전기가 대규모 계통망에 연결된 경우에는 정상 상태 계인 즉, 여자 시스템의 증폭비(K_A)만을 고려하나 약한 계통에서는 전압안정을 위한 속응성이 요구되어지기 때문에 여자 시스템의 PI계인(또는 Lead-Lag 계인)을 포함하는 과도 계인(K_T)의 중요성이 커진다. 따라서 본 장에서는 실제적으로 여자 시스템의 계인 튜닝 방법을 본 장의 마지막에 소개하였다.

3.1. 회전형 여자 시스템

그림 3는 AC 회전형 여자 시스템의 구성도를 보여 주고 있는 것으로써 처음으로 전원을 만들어 내는 PMG(Permanent Magnet Generator)와 여자용 발전기의 계자 전류를 제어하는 정류기 그리고 AC 회전형 여자용 발전기 그리고 여자용 발전기의 출력을 DC 전력으로 변환하는 다이오드 브리지로 구성되어질 수 있다. 그리고 그림 3 b)는 AC 회전형 여자 시스템의 제어 전달함수 블록을 보여 주고 있다.



(a) Schematic diagram of AC rotating excitation system.



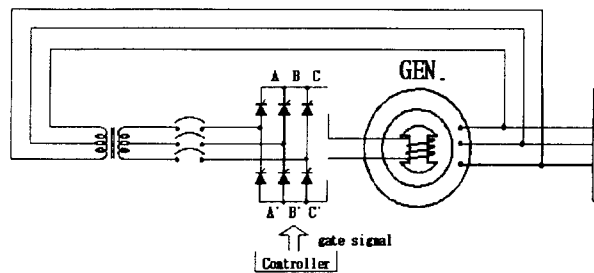
(b) AC rotating excitation system modelling

그림 3 일반적인 회전형 AC 여자 시스템
Fig. 3 Conventional AC excitation system

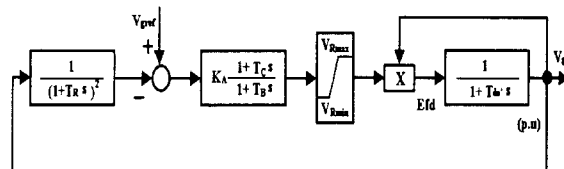
이 시스템에서 여자용 발전기는 발전기의 로터와 함께 터빈에 같은 축으로 물려있고 여자용 발전기의 교류 출력은 다이오드 브리지를 통해 정류되어 발전기 계자에 필요한 직류 전류를 생성한다. 다이오드 브리지는 회전형(Brushless type) 또는 고정형(슬립링을 이용한 고정형)으로 구분되기도 한다. 이 시스템은 그림 3 b)에서 볼 수 있는 것 같이 시스템의 시정수가 대단히 크기 때문에 시스템의 속응성이 낮다. 반면에 여자 전원이 발전기 단자로부터 공급되지 않으므로 안정도의 관점에서 이 시스템은 정지형 여자 시스템보다 더욱 안정된 시스템이라 볼수 있다.

3.2 회전형 여자 시스템

그림 4는 정지형 여자시스템을 보여 주고 있다. 이 여자 시스템은 동기 발전기, 제어기 및 컨버터로 구성되어 있다. 이 시스템에서 여자 전원은 발전기 단자로부터 변압기를 통하여 공급된다. 이 시스템은 내재된 시정수가 매우 작고 경제적이며 유지보수가 쉽기 때문에 현재 전체 AC계통의 60~70%정도에 채용되고 있으며 DC 여자 시스템이나 AC 회전형 여자 시스템을 노후화하여 철거하는 경우에 대체 여자 시스템으로 많이 사용하고 있다.



(a) Schematic diagram of static excitation system.



(b) Static excitation system modelling

그림 4 일반적인 정지형 여자 시스템
Fig. 4 Conventional static excitation system

그러나, 이 시스템은 여자 시스템 최대 출력전압을 발전기 출력단에서 공급받기 때문에 계통 전압의 영향에 민감하다. 그러므로 발전기 단자전압을 저하시키는 계통 고장 조건인 동안에, 사용 가능한 계통의 최고전압이 줄어든다. 이러한 점이 계통의 전압 변동이 심한 HVDC 연계 시스템에서 많이 사용되지 못하는 점이다.

3.3 정지형 여자 시스템의 제어기 설계

그림 4(b)에 보여준 정지형 여자기의 제어기 파라미터는 다음과 같이 설계되어진다. 여자 시스템의 정상상태 여자 게인(K_A)은 식 (8)과 같이 설계된다. 그리고 그림 4 a)에서 보여지는 여자용 변압기의 2차 전압은 식 (9)와 같이 설계된다.

$$K_A \geq \frac{V_{fN} - V_{f0}}{V_{f0}} \times \frac{100}{\epsilon} \quad (8)$$

$$V_2 = \frac{\pi (V_P \times V_{f0} + V_D)}{3\sqrt{2} \times (\cos \alpha - 0.5 \times Z_T)} \quad (9)$$

여기서, V_{fN} 은 전부하 계자전압, V_{f0} 은 무부하 계자전압, Z_T 는 변압기 임피던스, V_D 는 사이리스터 전압강하 그리고 ϵ 은 전압 변동률(%)이다.

그림 4(b)와 같이 여자시스템은 lead-lag 보상기, 여자 시스템의 출력 제한기 형태로 표현되는 여자 시스템의 정상전압, 그리고 여자시스템 정상상태 게인(K_A)으로 구성되어진다. 앞서서도 설명했듯이 약한 계통에서는 여자 시스템의 파라미터가 중요한 역할을 하기 때문에 여자 시스템의 동특성을 포함하고 있는 여자 시스템의 과도 게인(K_T)을 고려해야만 한다. 여자 시스템의 과도게인의 정의는 여자시스템의

단순 증폭비만 고려하는 정상상태 게인(K_A)과 달리 시스템의 속응성을 결정하는 **Lead-lag** 제어기 그리고 여자시스템의 정상전압을 포함하는 게인을 말한다. 그리고 여자 시스템 과도게인을 구하는 수식은 식 (10)에서부터 식 (12)까지 보여 주고 있으며 **lead-lag** 제어기의 게인 결정법은 일반적으로 현장에서 많이 사용하는 주파수 해석법인 **gain margin** 과 **phase margin**법이 사용하였다.

$$K_T = K_A T_C / T_B \quad (10)$$

$$K_T \geq V_{Rmax} / \Delta V_R \quad (11)$$

$$K_T / T_{do'} = \omega_c \quad (12)$$

$$1/T_C < \omega_c / n \text{ (where, } n \geq 2) \quad (13)$$

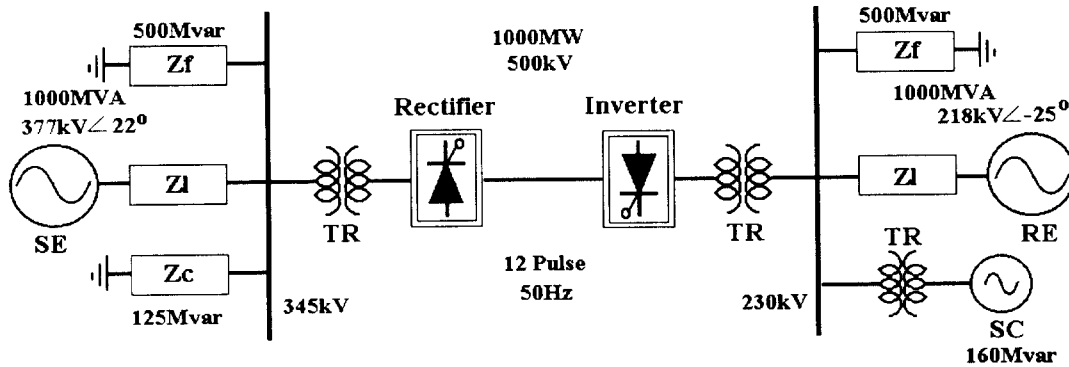


그림 5 CIGRE 모델에 기반을 둔 HVDC 계통 모델
Fig. 5 HVDC Model Based on CIGRE MODEL

식 10에서부터 식 13에서 보는 바와 같이 정지형 여자 시스템의 성능은 **Lead-lag** 제어기의 파라미터와 정상전압에 의해 영향을 받는다. 따라서 정상전압에 따른 **Lead-lag** 제어기 선택이 잘못되면 대규모 계통에 연결된 발전기라 할지라도 발전기 시스템이 탈락될 수 있으며 발전기의 출력 전압이 동요할 수 있고 약한 시스템에서는 그 영향이 더 크다 할수 있다. 이러한 이유 때문에 약한 계통에서는 정지형 여자 시스템을 많이 사용하지 않는다. 한편, 그림 4(b)에서 보여지는 V_{Rmax} 와 식 (9)에서 보여지는 V_p 는 여자 시스템의 정상 전압 (V_{Rmax})을 나타내고 있다..

4. 약한 계통에서 동기조상기를 가진 HVDC

4.1. 계통 검토

그림 5는 HVDC와 연결된 AC 계통을 보여 주고 있다. 본문에서 검토하는 HVDC 시스템은 수정된 CIGRE 모델이며 HVDC 시스템에서 사용하는 제어기의 구조와 파라미터는 모두 CIGRE 모델과 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 HVDC 시스템은 용량이 1000MW, 500KV, 12 pulse 컨버터를 가지고 있으며 단극(Monopole system)을 갖는 시스템이며, 수전단 측, 인버터 측의 SCR과 ESCR은 각각 1.8

$\angle -80^\circ$ 과 $1.3 \angle -66^\circ$ 이다. CIGRE 모델에서 사용하는 무효전력 보상 방법은 기본적으로 HVDC 수전단에 병렬로 11차, 13차 고조파 필터와 콘덴서 뱅크를 이용해서 500Mvar의 무효전력을 보상하고 과도 상태에서 무효전력을 보상하기 위해서 $-165[Mvar] \sim 300[Mvar]$ 의 동기조상기가 HVDC 수전단에 설치되었다.

4.2. 동기조상기에 의한 HVDC 계통의 영향

동기조상기의 여자제어 시스템의 제어 파라미터 결정에 관한 수식은 식 (10) ~ 식 (13)에 보여지고 있다. 표 1은 여자 시스템의 정상전압을 변화에 따른 **Lead-lag** 제어기의 파라미터 변화를 보여 주고 있다.

그림 6은 동기조상기가 표 1에서 보여준 여자시스템 파라미터를 가진 경우에 HVDC 시스템의 DC전압 응답 파형을 보여 주고 있다.

표 1 정지형 여자 시스템에서 정상전압의 변화에 따른 제어 파라미터

Table 1 Control Parameter according to the ceiling voltage variation of static exciter

	Case 1 $V_{Rmax} = 6$	Case 2 $V_{Rmax} = 7$	Case 3 $V_{Rmax} = 8$
T_C	0.1[s]	0.08[s]	0.07[s]
T_B	0.375[s]	0.2553[s]	0.194[s]
(여기서, $K_A = 150[p.u/p.u]$, $T_{do'} = 2[s]$, $\omega_c = 10[db]$)			

그림 6은 HVDC 시스템의 DC 전압이 정상상태에서 매우 많이 흔들리는 것을 보여 주고 있으며 그림 6 c)와 같은 경우에는 정상상태에서 HVDC 시스템이 붕괴되는 현상을 볼 수 있다.

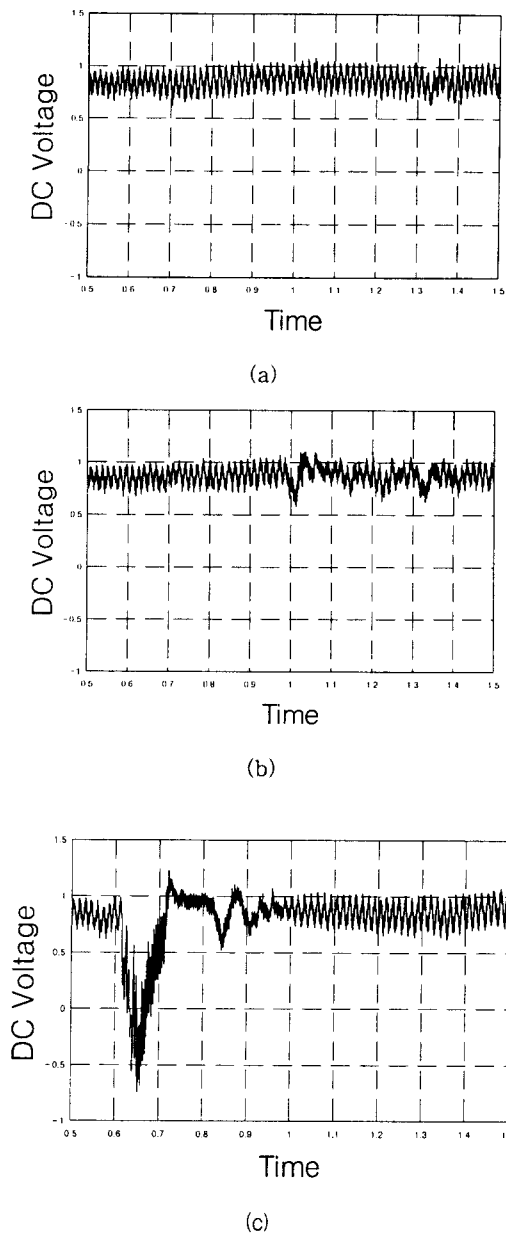


그림 6 정지형 여자 시스템의 정상전압의 변화에 따른 HVDC 시스템의 DC 전압파형
(a) 표1의 case 1, b) 표2의 case 2, c) 표1의 case 3)

Fig. 6 DC voltage of HVDC according to the ceiling voltage variation of static exciter

이러한 현상은 3장에서 논한 것과 같이 정지형 여자시스템의 입력 전원을 자기가 제어하고자 하는 동기조상기의 출력 전압으로부터 받기 때문에 일어나는 현상이다. 이러한 현상은 대규모 계통에서는 그다지 문제가 되지 않으나 약한 계통에서는 상당히 큰 문제를 유발할 수 있음을 보여 주고 있다.

반면에 그림 7은 3장에서 논한 AC 회전형 여자 시스템을 동기조상기의 여자시스템으로 사용한 경우의 HVDC DC 전압 응답 파형을 보여 주고 있다.

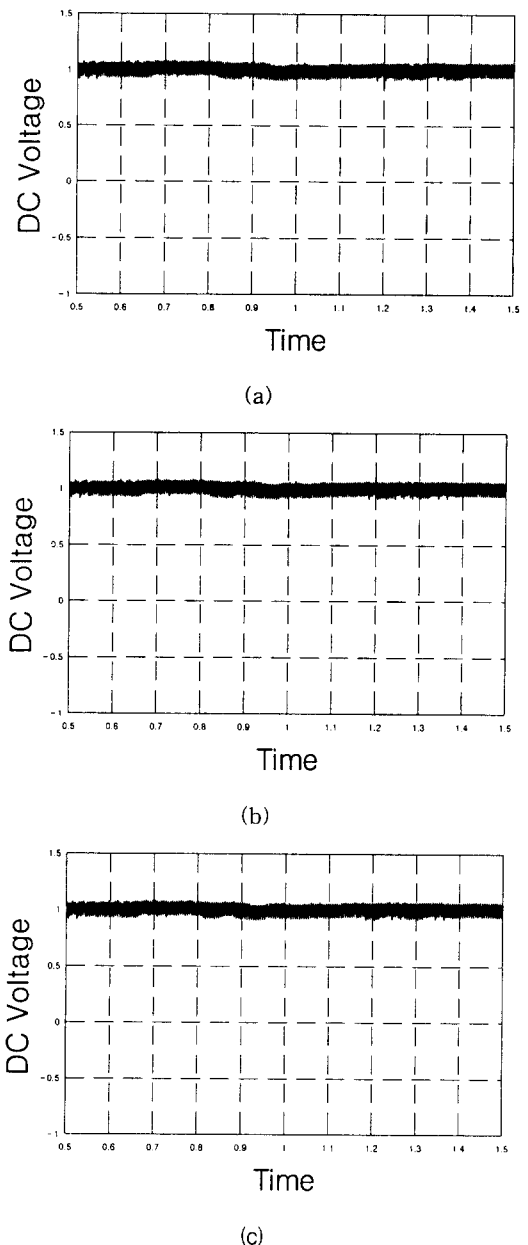


그림 7 AC 회전형 여자 시스템의 정상전압의 변화에 따른 HVDC 시스템의 DC 전압파형(a) $V_{Rmax}=5, V_{Rmin}=0$
b) $V_{Rmax}=6, V_{Rmin}=0$ c) $V_{Rmax}=7, V_{Rmin}=0$)

Fig. 7 DC voltage of HVDC according to the ceiling voltage variation of AC rotating exciter

AC 회전형 여자 시스템의 특징은 그림 3 b)에서 보여 주는 것 같이 많은 파라미터에 의해 영향을 받기 때문에 제어기의 구성이 상당히 어려울 수 있다. 그리고 AC 회전형 여자 시스템과 정지형 여자 시스템은 다른 구조와 다른 파라미터를 가지고 있기 때문에 정지형 여자 시스템과 서로 비교하기가 어렵지만 본 논문에서는 단순히 AC 여자 시스템의 특성만을 확인하기 위해서 그림 5 b)에서 보여 주는 $T_B, T_C, T_{d0}, T_A, V_{Amax}, V_{Amin}, T_{EX}, K_{EX}$, 그리고 T_{KA} 는 고정되어 있고 단지 정상전압(V_{Rmax})만이 변한 경우를 모의

하였다. 또한 AC 회전형 여자시스템의 여자기용 발전기의 시정수가 워낙 크기 때문에 **lead-lag** 제어기의 파라미터를 바꾼다고 하더라도 계통에 큰 영향을 주지 않는다.

그림 7은 AC 회전형 여자시스템의 정상전압이 변함에 따른 HVDC DC전압 응답 파형을 보여 주고 있는 것으로써 정지형 여자시스템을 모의한 그림 6과 큰 차이를 보인다. AC 회전형 여자시스템을 가진 동기조상기를 HVDC 수전단에 설치한 경우는 HVDC 시스템의 DC 전원이 매우 안정해 지는 것을 알 수 있다.

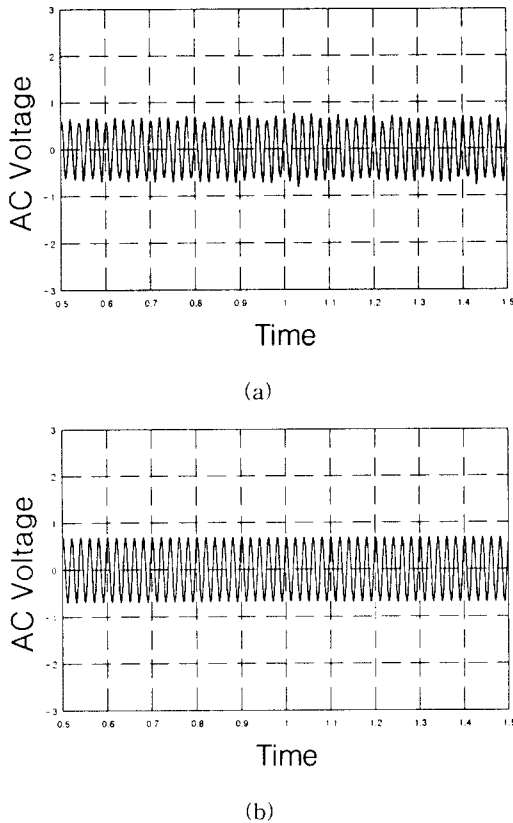


그림 8 여자기 형태에 따른 AC 계통의 AC 전압
(a) 정지형 여자기, (b) AC 회전형 여자기)
Fig. 8 AC voltage of AC network according to the exciter types

그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 HVDC 시스템의 DC 전압응답이 차이가 나는 이유는 HVDC 시스템 수전단에 설치되어 있는 동기조상기가 AC 전압을 제대로 제어하지 못하기 때문에 일어나는 현상으로 그림 8은 동기조상기용 여자시스템의 형태에 따른 계통의 AC 전압 파형을 보여 주고 있는 것으로써 그림 8 a)는 동기조상기의 여자시스템이 정지형인 경우를 보여주고 있으며 그림 8 b)는 동기조상기의 여자시스템이 AC 회전형인 경우를 보여 주고 있다.

그림 8에서 보는 바와 같이 동기조상기에 정지형 여자시스템을 설치한 경우는 AC 전압이 흔들리는 것을 확인할 수 있으며, 회전형인 경우에는 AC 전원이 매우 안정한 것을 알 수 있다. 이러한 AC 전압의 동요는 그림 6에서 보여지는 HVDC 시스템의 DC전압의 동요의 원인이 된다.

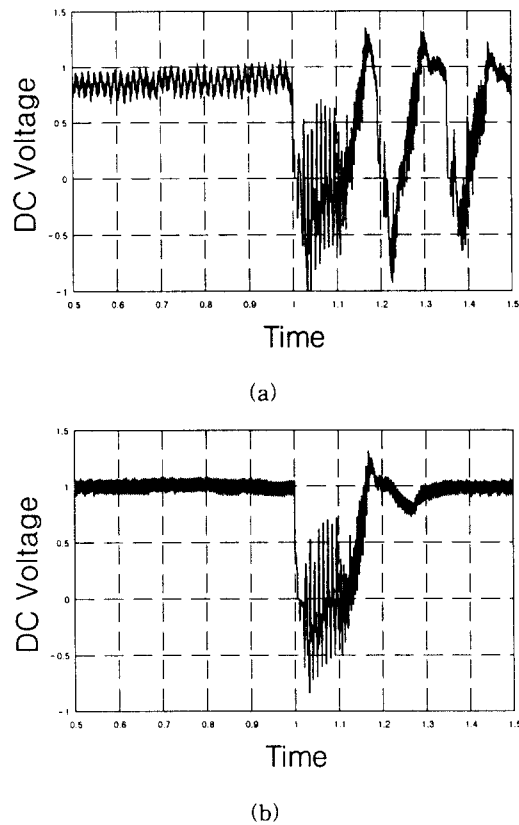


그림 9 인버터측의 AC 계통에 100ms 단상 지락 고장이 발생한 후 HVDC 시스템의 DC 전압 파형 (a) 그림 8 b)와 같은 파라미터를 가진 정지형 여자 시스템, b) 그림 9 b)와 같은 파라미터를 가진 AC 회전형 여자 시스템)
Fig. 9 DC voltage after 100ms faults at inverter AC side

그림 9 a)는 그림 6 b)의 조건에서 AC 계통에 100ms 단상 고장을 인위적으로 발생시킨 후의 HVDC DC전압 응답 파형을 보여준다. 그림 6 b)에서는 정상상태에서 시스템이 동요하는 현상만이 관측되고 계통이 붕괴되는 현상은 없지만 AC고장을 일으키는 경우에는 그림 9 a)에서 보는 바와 같이 시스템이 붕괴되는 현상을 볼 수 있다. 반면에 그림 9 b)는 그림 7 b)의 조건에서 AC 계통에 인위적으로 100ms 단상고장 일어난 경우의 HVDC DC전압 응답 파형을 보여 주고 있다. 이 경우에는 시스템이 고장 후에 안정하게 회복되는 것을 알 수 있다.

4.3 문제 해결

본 논문에서는 이상에서 논한 동기조상기용 여자시스템의 형태에 따른 HVDC시스템의 문제점을 해결하기 위해서 다음과 같은 3가지 방향에서 접근하였다.

- 첫 번째 방법은 HVDC 시스템의 제어기 파라미터를 튜닝
 - 두 번째 방법은 동기조상기의 제어기 파라미터 튜닝
 - 세 번째 방법은 동기조상기의 여자 시스템 변형 (AC 회전형 시스템의 장점 + 정지형 여자 시스템의 장점)
- 첫 번째로 HVDC 시스템은 인버터의 γ 제어기 계인이 증가하고 γ 계인의 시정수가 감소하면, HVDC 시스템의 안정도

는 향상되어 진다. 따라서 정지형 여자 시스템을 가진 동기 조상기를 HVDC 계통에 연결한 경우에, HVDC 시스템의 안정도를 높이기 위해서 HVDC γ 제어기의 PI 게인을 조정함에 따른 전압 동요현상을 확인해 보기로 하겠다.

그림 10은 그림 6 c)의 경우(가장 극단적인 경우 : 정상상태에서 시스템이 붕괴되는 경우)에서 γ 제어기의 P제어 게인을 1에서 0.63으로 조정하였고, γ 제어기의 I제어 게인을 0.01524에서 0.02로 조정하였을 때 HVDC 시스템 DC전압 응답 파형을 보여 주고 있다. 이 그림에서 HVDC 시스템의 파라미터 튜닝은 그림 6 c)에서 보여지는 시스템의 붕괴를 유발하지는 않으나 정상상태 전압동요와 AC 계통의 100ms 단상 고장 후에 시스템이 붕괴되는 현상은 제거 할 수 없었다.

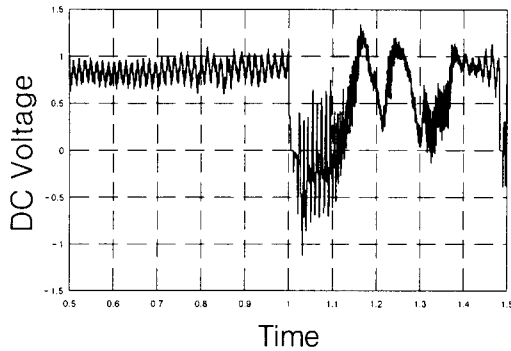


그림 10 HVDC 제어기의 게인 튜닝에 따른 HVDC 시스템의 DC 전압 파형(P게인 : 1--> 0.63, I 게인 : 0.01524 --> 0.02, 정상전압은 $V_{Rmax} = 8$ and $V_{Rmin} = -8$)

Fig. 10 DC voltage after 100ms faults at inverter with tuned HVDC controller gain

두 번째로 여자 시스템의 제어 파라미터를 튜닝하는 방법으로서 식 6 c) 조건은 ω_c 가 10인 경우인 반면 그림 11은 식 (12)로 부터 여자 시스템의 정상 상태 오차를 줄이기 위해서 ω_c 를 20으로 증가시킨 경우를 보여 주고 있다. 이 경우에도 그림 10의 경우와 같이 어느 정도 시스템 성능은 향상시키지만 근본적 해결책이 될 수 없음을 알 수 있다.

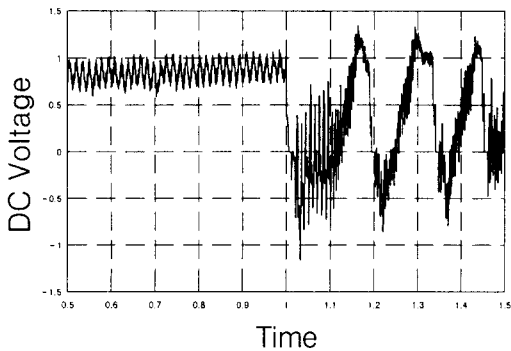


그림 11 여자기 제어기의 게인 튜닝에 따른 HVDC 시스템의 DC 전압 파형(ω_c : 10 --> 20, 정상전압은 $V_{Rmax} = 8$ and $V_{Rmin} = -8$)

Fig. 11 DC voltage after 100ms faults at inverter with tuned exciter controller gain

세 번째 방법으로는 정지형 여자 시스템의 구조를 변형시키는 방법으로써 그림 12와 그림 13은 변형된 정지형 여자 시스템을 보여 주고 있다. 그림 12는 여자 시스템의 TCR (Thyristor Current Rectifier)의 아래쪽 3개의 싸이리스터를 다이오드로 대체한 것으로 이는 그림 4 b)의 네거티브 정상전압 (V_{Rmin})을 0으로 만든 경우이다. 그리고 그림 13은 정지형 여자시스템의 형태를 AC to DC to Chopper 형태로 바꾼 것을 보여주고 있다. 그림 13은 그림 4 a)의 정지형 여자시스템과 비교하여 시스템이 상당히 복잡해 보이지만 AC 계통의 영향을 동기조상기의 계자측에 직접적으로 전하지 않고 과도 전원(Transient Battery)역할을 하는 콘덴서를 거쳐 Chopper 입력 단에 전해 주기 때문에 정지형 여자 시스템이 갖는 근본적인 결함을 제거할 수 있다.

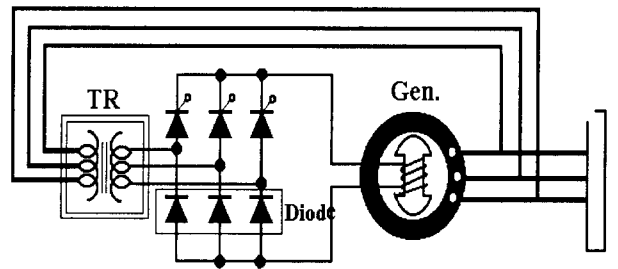


그림 12 수정된 정지형 여자 시스템
Fig. 12 Modified Static Exciter

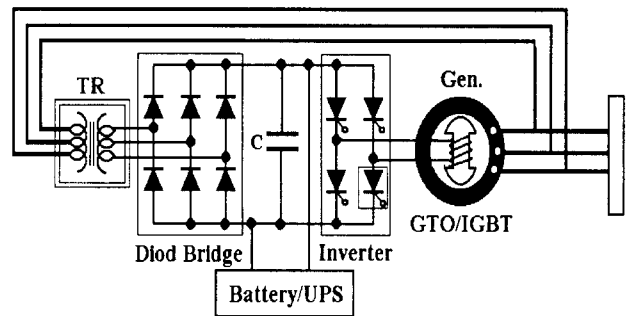


그림 13. 제안된 정지형 여자 시스템
Fig. 13 Proposed excitation system

그림 14는 그림 13의 정지형 여자 시스템을 동기조상기에 설치한 경우, HVDC 시스템의 DC 전압 응답 파형을 보여 주고 있다. 이 경우를 보면 HVDC 시스템의 DC 전압이 정상상태에서 동요하는 현상은 관측되지 않으나 AC 계통에서 발생한 100ms 고장 후에 여자 시스템의 네거티브 정상전압이 0이기 때문에 ($V_{Rmin} = 0$) 전압 댐핑 효과가 떨어져서 DC 과전압이 1.5[p.u]까지 상승하여 오래 지속되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이러한 경우는 좋은 해결책이라고 볼 수 없다.

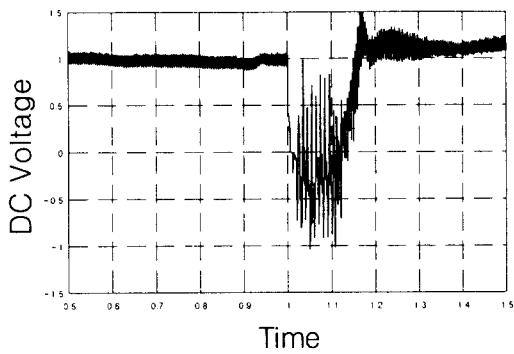


그림 14 동기조상기가 수정된 정지형 여자 시스템을 가진 경우에 HVDC 시스템의 DC 전압파형 ($V_{Rmax} = 8$ 과 $V_{Rmin} = 0$)

Fig. 14 DC voltage of HVDC when synchronous machine with a proposed exciter is connected to HVDC bus

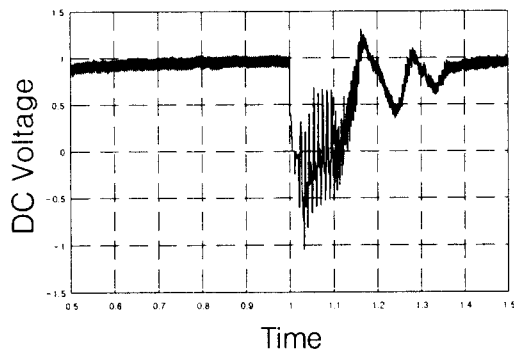


그림 15 동기조상기가 제안된 정지형 여자 시스템을 가진 경우에 HVDC 시스템의 DC 전압 파형 ($V_{Rmax} = 8$ 과 $V_{Rmin} = -8$)

Fig. 15 DC voltage of HVDC when synchronous machine with a proposed exciter is connected to HVDC bus

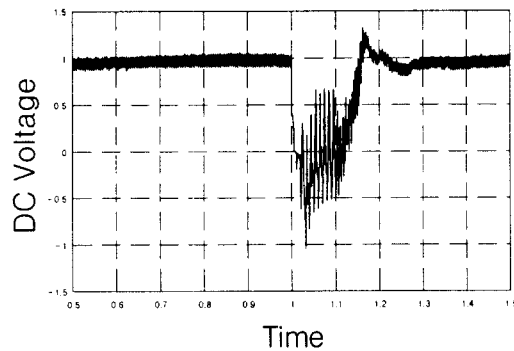


그림 16 동기조상기가 제안된 정지형 여자 시스템을 가진 경우에 HVDC 시스템의 DC 전압파형 ($V_{Rmax} = 8$ 과 $V_{Rmin} = -4$)

Fig. 16 DC voltage of HVDC when synchronous machine with a proposed exciter is connected to HVDC bus

그림 15는 그림 13에서 보여주는 AC to DC to Chopper 컨버터를 동기조상기용 여자시스템에 설치한 경우 HVDC 시스템의 DC 응답 파형을 보여 준다. 이 경우를 보면 제안된 방식은 정상상태에서 전압동요현상은 없지만 고장 후에 동기조상기의 회전자에 의한 DC 전압동요 현상이 관측되고 있다. 이 경우에서 만약 (-)정상전압 ($V_{Rmin} = -8$)이 $-8p.u$ 로 조정하지 않고 $-4p.u$ ($V_{Rmin} = -4$)로 조정된다면 그림 16에서 보는 바와 같이 좋은 제어 응답특성을 갖게 된다.

그림 16에서 보여주는 독립전원 방식 정지형 여자시스템의 정상전압은 그림 13의 콘덴서 C 양단에 걸리는 전압이 되나 Chopper의 게이팅 각도 수정에 따라 바뀌어 질 수 있다.

5. 결 론

약한 계통에서 동기조상기의 사용은 필수적이다. 특히 수전단의 관성이 0(수전단에 발전력이 전혀 없는 경우)인 경우에는 HVDC가 재기동을 하기 위해서 동기조상기의 존재는 필수적이다. 동기조상기의 주된 목적이 무효전력을 보상하는 것이지만 SVC나 STACON과 같은 무효전력 보상장치는 HVDC시스템을 재기동 (HVDC에서는 Black-Start라 부른다)시킬 수 있는 능력을 가지고 있지 못하다. 동기조상기는 발전기의 일종으로서 무효전력을 조정하는 여자 시스템의 종류에 따라 다른 특성을 가지고 있다. 정지형 여자 시스템은 속응성과 보수 유지의 간편성 때문에 많이 각광받고 있는 형태임에도 불구하고 시스템이 가지고 있는 본질적인 결함 때문에 약한 계통에 연결된 경우에는 많은 문제점을 노출시키고 있다. 반면에 AC 회전형 여자 시스템은 속응성이 낮음에도 불구하고 여자의 공급전원이 안정하다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 여자 시스템의 장단점을 분석하고 정지형 여자 시스템의 장점과 AC 회전형 여자 시스템의 장점을 결합한 새로운 여자 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 HVDC 시스템에 연결된 경우에 좋은 제어 특성을 보여 주었으며 결과는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] O.B.Nayak, A.M.Gole, et. al, "Dynamic Performance of Static and Synchronous Compensators at HVDC Inverter Bus a very Weak AC System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9. No.3, pp.1350-1358, 1994.
- [2] P.S.Bodger, G.D. Irwin, D.A.Woodford, "Controlling Harmonic Instability of HVDC Links Connected to Weak AC System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.4, pp. 2039~pp.2046, 1990.
- [3] Y. Zhuang, R.W.Menzies, O.B.Nayak, et. al, "Dynamic Performance of STACONt at HVDC Inverter feeding a very Weak AC System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11. No.2, pp.958-964, 1996.
- [4] C. V. Thio, J. B. Davies, " New Synchronous

Compensator for the Nelson River HVDC System-
Planning Requirements and Specification", IEEE
Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2,
pp.922- 928, 1991.

[5] N.Kaul, R.M. Mathur, "Solution to The Prpblem of
Low Order Harmonic Resonance from HVDC
Converter", IEEE Transactions on Power Systems,
Vol.5. No.4, pp.1160-1166, 1990.

[6] The IEEE Special Stability Controls Working Group
and the Dynamic Performance and Modeling of DC
Systems Joint Working Group, "HVDC Controls for
System Dynamic Performance", IEEE Transactions on
Power Systems, Vol.6, No.2, pp743-752, 1991.

[7] N. A. Vovos, G. D. Galanos, "Enhancement of the
Transient Stability of Integrated AC/DC System
Using Active and Reactive Power Modulation", IEEE
Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.
PAS-104. No.1, pp.1696-1702., 1985.

[8] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. "Power
Electronics: Converters, Applications and Design"
second edition, John Wiley and Sons, 1995.

기호 및 수식

T_R = Sensor time constant,
 T_C = Lead compensator gain,

T_B = Lag compensator gain,
 V_{Rmax} = Max. ceiling voltage,
 V_{Rmin} = Min. ceiling voltage,
 $T_{do'}$ = Generator time constant,
 V_g = Generator terminal voltage,
 T_A = Exciter time constant,
 V_{Amax} = Max. ceiling voltage of exciter generator,
 V_{Amin} = Min. ceiling voltage of exciter generator,
 T_{EX} = Exciter generator time constant,
 K_{EX} = Exciter generator gain,
 $T_{do'}$ = Generator mech. time constant,
 T_{gA} = AC rotating exciter lag compensator,
 E_{ac} = AC network voltage,
 Z_{ac} = AC network total impedance,
 Z_C = Capacitor impedance,
 Z_l = AC line impedance,
 Z_f = AC filter impedance,
 Z_s = AC generator impedance,
 ω_0 = Fundamental frequency of AC network,
 P_d = DC power,
 E_{FD} = Excitation output voltage,
 ΔV = Available generator voltage.

저 자 소 개

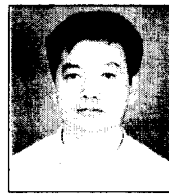


김 찬 기 (金 燦 起)

1968년 12월 17일생, 1991년 서울산업대 전기공학과 졸업(학사), 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년 전력연구원 입사, 현재 전력 연구원 선임 연구원

Tel : 042-865-5892, Fax : 042-865-5844

E-mail : cckim@kepri.re.kr



심 응 보 (沈 應 輔)

1959년 12월 23일생, 1982년 한양대 전기공학과 졸업, 현재 한전 전력연구원 송변전기술그룹 책임연구원

Tel : 042-865-5890, Fax : 042-865-5844

E-mail : ebshim@kepri.re.kr



김 정 부 (金 正 夫)

1943년 11월 14일생, 1971년 서울대 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실장

Tel : 042-865-5800, Fax : 042-865-5804

E-mail : jbkim@kepri.re.kr