

HVDC 컨버터의 Thyristor Valve 시험을 위한 새로운 합성시험회로

김경태¹, 한병문[†], 정재현², 노의철², 정용호³, 백승택³

A New Synthetic Test Circuit for Testing Thyristor Valve in HVDC Converter

Kyeong-Tae Kim¹, Byung-Moon Han[†], Jae-Hun Jung², Eui-Cheol Nho²,
Yong-Ho Chung³, and Seung-Taek Baek³

Abstract - This paper proposes a new synthetic test circuit (STC) to confirm the switching operation of thyristor valve in HVDC converter. The proposed STC uses a 6-pulse thyristor converter with 2-phase chopper as a high-current source to provide turn-on current to the test valve. The operation of proposed STC was verified through theoretical analysis and computer simulations. Based on computer simulations, a hardware scaled model was built and tested to confirm the feasibility of implementing a real-size test facility. The proposed system has an advantage of simple structure and operation over the existing system.

Keywords: STC(Synthetic Test Circuit), HVDC(High Voltage DC) transmission, 6-pulse thyristor converter 2-phase chopper, test valve, auxiliary switching circuit

1. 서 론

직류송전시스템(HVDC Transmission System)은 사용하는 전력변환기의 밸브형태에 따라 Thyristor를 기반으로 하는 전류원 방식과 IGBT를 기반으로 하는 전압원 방식으로 구분한다. 전류원 방식은 1980년대 초에 설치되기 시작하여 지금까지도 상용으로 많이 설치되고 있다^[1]. 반면에 전압원 방식은 2000년대 초반에 상용으로 설치되기 시작하여 그 용량이 계속 증가하는 추세이나 아직 전류원에 비해 용량이 적고, 주로 대단위 해상풍력 단지를 교류 전력망에 연계하는데 활용되고 있다^[2].

따라서 대용량 전송에서는 아직도 Thyristor를 기반으로 하는 전류원 방식이 보편적이다. 국내에서도 해남과 제주를 해저케이블로 연계한 300MW, 180kV, 전류원 HVDC System이 현재 운전 중에 있고, 진도와 제주를 해저케이블로 연계하는 400MW, 250kV, 전류원 HVDC

System을 건설 중에 있다. 또한 이와는 별도로 한전과 LS산전이 공동으로 제주도에 80MW, 100kV Pilot Test System을 건설하고 HVDC System의 국산화를 추진하고 있다.

HVDC System을 구성하는 가장 중요한 요소가 교류를 직류로 그리고 직류를 교류로 변환하는 전력변환기이다. 이 전력변환기는 동작전압이 매우 높아 다수의 Thyristor가 직렬로 연결되어 하나의 밸브를 구성하고 있는데, 각 밸브가 정상적으로 동작하는 가를 시험하기 위해서는 전력변환기를 설치하기 전에 인가될 전압과 전력으로 동작을 확인하는 것이 타당하다. 그러나 이렇게 할 경우 거대한 시험시설이 필요하고 막대한 전력의 소모되며, 안전상 많은 주의가 필요하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 정격 전압과 전력으로 시험하는 대신 전력변환기가 해당 전압과 용량으로 동작할 때 각 Thyristor 밸브에 걸리는 전압과 전류 특성을 인위적으로 모의하는 방식이 고안되었는데 이러한 방식을 구현하기 위한 회로를 합성시험회로 STC(Synthetic Test Circuit)라고 한다^[3,4,5].

합성시험회로는 밸브가 턴-온 될 때 인가되는 순방향 전류를 공급하는 저전압 대전류원과 턴-오프 될 때 인가되는 역방향전압과 순방향전압을 공급하는 소전류 고전압원으로 구성되어 있는데, 현재 ABB사, Siemens사,

Paper number: TKPE-2012-17-3-1 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: erichan@mju.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Myongji University

Tel: +82-31-330-6366 Fax: +82-31-321-0271

¹ Dept. of Electrical Eng., Myongji University

² Dept. of Electrical Eng., Pukyong University

³ HVDC Research Group, LS Industrial Systems

Manuscript received Jan. 9, 2012; accepted Feb. 10, 2012

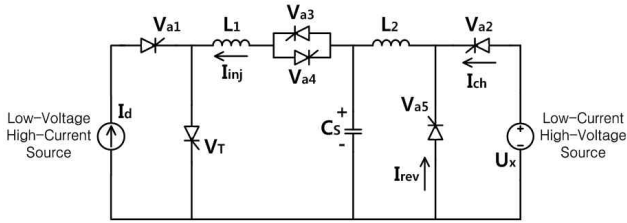


Fig. 1 Configuration of Synthetic Test Circuit

Alstom사가 저전압 대전류원을 구성하는 방식을 달리하여 각사가 독자적인 합성시험회로를 구성하여 운용 중에 있다^[6,7,8].

본 논문에서는 2상 초퍼를 이용하여 턴-온 전류를 공급하는 새로운 구조의 저전압 대전류원을 갖는 새로운 합성시험회로를 제안하고 그 동작을 분석하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 또한 시뮬레이션 분석을 기반으로 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 실시하여 실규모 합성시험회로를 개발하는데 활용할 수 있도록 하였다.

2. 합성시험회로의 동작원리

합성시험회로는 그림 1과 같이 시험밸브(V_T)가 턴-온 될 때 인가되는 전류를 공급하는 저전압 대전류원과 턴-오프 될 때 인가되는 역방향전압과 순방향전압을 공급하는 소전류 고전압원, 그리고 턴-온과 턴-오프를 연속적으로 동작하기위한 공진회로로 구성되어 있다.

공진회로는 Thyristor로 구성된 보조밸브를 적절히 온 또는 오프 하여 시험용 밸브에 가해지는 전압의 극성을 반전한다. 공진회로는 3개의 보조밸브 $V_{a3} - V_{a5}$, 공진용 커패시터 C_s , 그리고 공진용 리액터 L_1 과 L_2 로 구성되어 있다. 보조밸브 V_{a1} 은 시험밸브 V_T 에 대전류를 인가하는 역할을 하고 보조밸브 V_{a2} 는 손실로 감소된 C_s 의 전압을 보충하는 역할을 한다.

합성시험회로에 사용하는 전류원은 여러 가지 구성이 가능한데, ABB사는 2대의 6-펄스 Thyristor 컨버터를 Back-to-Back 형태로 결합한 구조를 사용하고, Siemens사는 한대의 6-펄스 Thyristor 컨버터를 사용하나 공진회로가 약간 변형된 구조를 사용한다. 또한 Alstom사는 한대의 6-펄스 Thyristor 컨버터에 직렬로 STATCOM을 결합한 방식을 사용한다. 어떠한 방식이든 합성시험회로에 사용하는 저전압 대전류원은 일반적으로 필요한 턴-온 전류를 발생하기에 충분한 용량을 가져야 하고 턴-온이나 턴-오프 시 전류의 상승이나 하강을 조절 가능해야 한다. 또한 합성시험회로에 사용하는 소전류 고전압원은 밸브가 턴-오프 될 때 양단에 걸리는 전압을 연속적으로 공급 가능해야 하고 시험 중 전압레벨을 적절하게 조절 가능해야 한다. 통상 소전류 고전압원은 배전전압을 정류하여 직접 사용하나 시험에

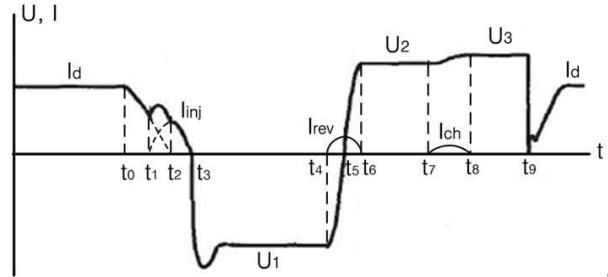


Fig. 2 Voltage-Current Waveform of Test Valve

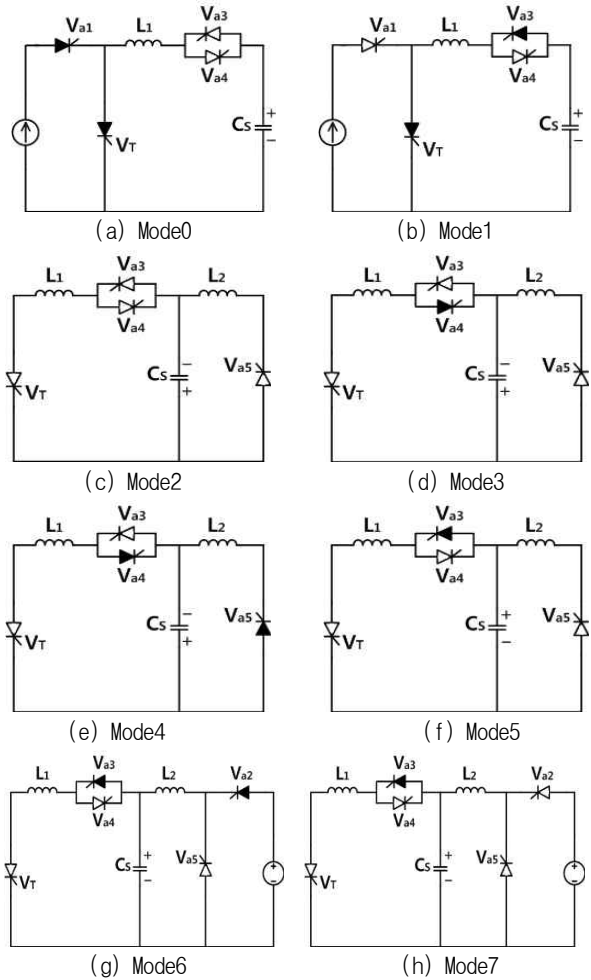


Fig. 3 Equivalent Circuit for Each Operation Mode

요구하는 전압이 높을 경우에는 배전전압을 Cockcroft-Walton 브리지를 이용하여 승압한 후 사용한다.

합성회로의 동작원리는 그림 2에 보인 V_T 에 인가되는 전압-전류 파형과 그림 3에 보인 각 모드별 동작회로, 그리고 표 1에 정리된 보조밸브의 동작순서에 의해 설명할 수 있다.

먼저 보조밸브 V_{a1} 과 시험밸브 V_T 는 ON되어 있어 전류원에서 전류가 공급되고 커패시터 C_s 는 그림 3a에 보인 극성으로 초기충전 되어있다. 보조밸브 V_{a3} 가 ON되면 그림 3b에 보인 것처럼 보조밸브 V_{a1} 은 OFF되고,

Table 1 Operation Sequence of Auxiliary Valve

Time	Valve	Path
$t_0 \sim t_1$	t_0 : V_{a1} ON V_T ON	$I_d - V_{a1} - V_T$
$t_1 \sim t_3$	t_1 : V_{a3} ON	$C_s - V_{a3} - L_1 - V_T$
	t_2 : V_{a1} OFF	
	t_3 : V_T OFF V_{a3} OFF	
$t_3 \sim t_4$	t_3 : V_{a4} ON	$C_s - V_T - L_1 - V_{a4}$
$t_4 \sim t_6$	t_4 : V_{a5} ON	$C_s - V_{a5} - L_2$
	t_5 : V_{a3} ON V_{a4} OFF	
	t_6 : V_{a5} OFF	
$t_7 \sim t_8$	t_7 : V_{a2} ON	$V_{a2} - L_2 - V_T$
	t_8 : V_{a2} OFF	
t_9	t_9 : V_{a1} ON V_T ON	$I_d - V_{a1} - V_T$

$C_s - V_{a3} - L_1 - V_T$ 는 공진회로를 구성하여 그림 3c에 보인 것처럼 커패시터 C_s 의 극성이 반전되고 보조밸브 V_{a3} 와 시험밸브 V_T 는 OFF된다.

보조밸브 V_{a4} 가 ON되면 그림3d에 보인 것처럼 반전된 커패시터 C_s 의 전압이 시험밸브 V_T 에 인가된다. 보조밸브 V_{a5} 가 ON되면 그림3e에 보인 것처럼 $C_s - V_{a5} - L_2$ 는 공진회로를 구성한다. 일정시간이 지나면 커패시터 C_s 의 전압은 그림 3f에 보인 것처럼 다시 반전되어 보조밸브 V_{a5} 와 보조밸브 V_{a4} 는 OFF되고, 보조밸브 V_{a3} 가 ON되면 시험밸브 V_T 에는 순방향전압이 인가된다.

그러나 순방향전압은 소자의 손실에 의해 초기상태보다 감소하는데 이를 보충하기 위해 그림 3g에 보인 것처럼 보조밸브 V_{a2} 를 ON하면 전압원이 커패시터 C_s 에 전압을 보충하고 이 전압은 그림 3h에 나타낸 것처럼 시험밸브 V_T 에 나타나고 커패시터 C_s 의 전압이 완전히 충전되면 보조밸브 V_{a2} 는 OFF된다.

3. 새로운 합성시험회로

기존 ABB사, Siemens사, Alstom사에서 개발한 합성 시험회로의 동작과 특성을 세부적으로 분석하고 이를 바탕으로 고유의 새로운 합성시험회로를 제안하였다. 제안하는 합성시험회로는 턴-오프 시 역방향과 순방향 전압은 2장에서 설명한 것과 동일하게 인덕터, 커패시터, 보조밸브로 구성된 공진회로를 이용한다. 그러나 시험밸브가 턴-온 될 때 전류를 공급하는 회로는 6-펄스 사이리스터 컨버터와 2상 초퍼, 그리고 턴-오프 보조회로로 구성되어있다.

그림 4는 제안하는 합성시험회로의 구성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 빨간 점선을 기준으로 좌측은 새로운 시험밸브에 전류를 인가하는 회로이고 우측은 전압을 인가하는 공진회로를 나타낸 것이다.

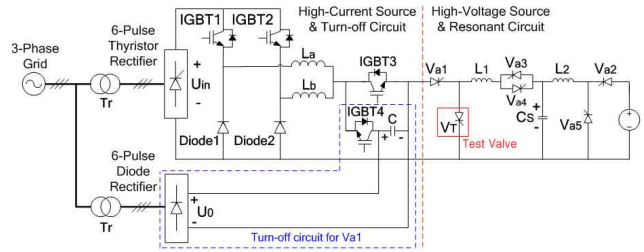


Fig. 4 Configuration of Proposed Synthetic Test Circuit

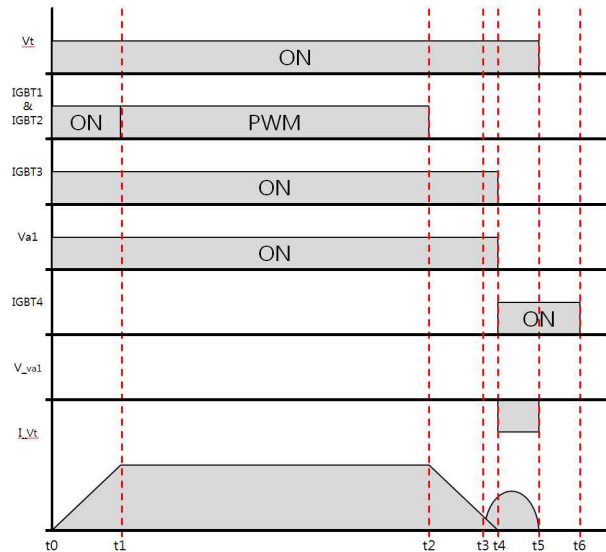


Fig. 5 Valve Voltage and Test Valve Current

시험밸브에 전류를 인가하는 회로는 6-펄스 위상제어 정류기, IGBT, 2상 초퍼, 그리고 다이오드정류기와 IGBT 스위치, 그리고 보조밸브의 턴-오프를 돕는 보조회로로 구성되어 있다. 6-펄스 위상제어정류기는 2상 초퍼의 입력전압을 조절하여 시험밸브로 공급되는 전류의 상승율을 제어하고 보조회로는 시험밸브의 턴-오프 특성을 조절하는 역할을 수행한다. 특히 그림에서 파란색 점선으로 표시한 6-펄스 다이오드정류기와 IGBT4 그리고 C로 구성된 보조회로는 IGBT3와 같이 보조밸브 V_{a1} 의 턴-오프 특성을 개선하기 위한 회로이다.

새로운 합성시험회로의 동작원리는 그림 5에 보인 각 소자별 Gate Pulse 파형과 그림 6의 각 모드별 동작회로, 그리고 표 2에 정리된 각 스위칭소자의 동작순서에 의해 설명할 수 있다.

그림 5는 제안하는 합성시험회로의 각 스위칭소자에 공급되는 Gate Pulse와 시험밸브 전류, 그리고 보조밸브 V_{a1} 에 인가되는 전압을 보여주고 있다.

그림 6은 새로운 합성시험회로의 동작을 스위칭 상태에 따라 모드별로 구분하여 동작회로로 나타낸 것이다. 여기서, 6-펄스 위상제어정류기 출력전압과 6-펄스 다이오드정류기의 출력전압을 각각 전압원 V_{in1} 과 V_{in2} 으로 등가화 하였다.

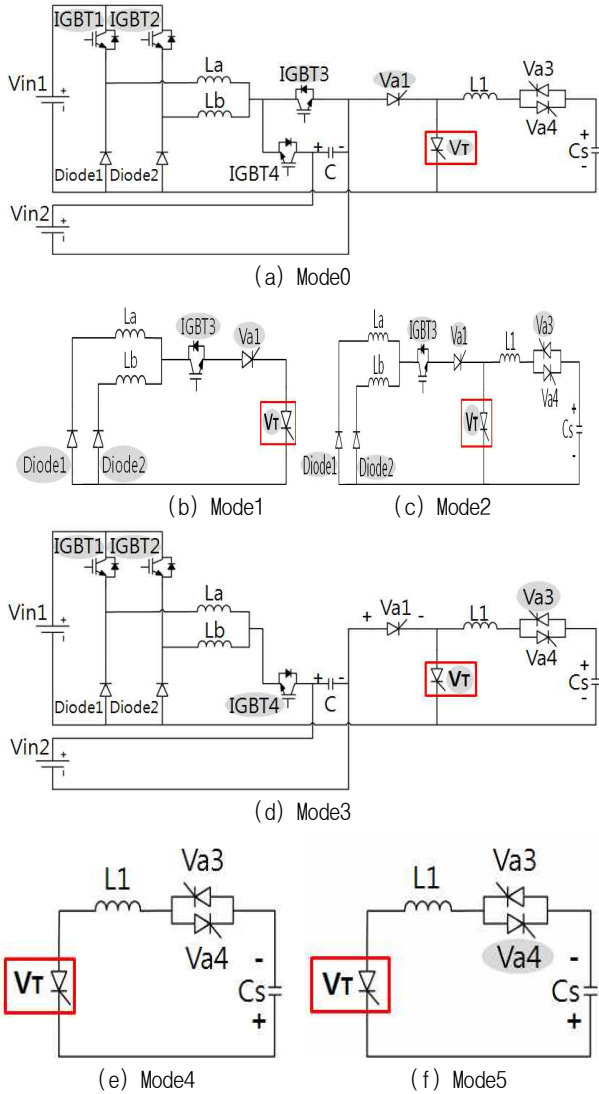


Fig. 6 Equivalent Circuit for Each Operation Mode

먼저 V_T , $IGBT1$, $IGBT2$ 그리고 $IGBT3$ 과 V_{a1} 이 ON되어 커뮤테이션 인덕터에 의한 전류상승 di/dt 를 모의하고, 이 때의 C_s 와 C 는 그림 6a에 보인 극성으로 초기충전 되어 있는 것으로 가정하였다. 전류가 원하는 값까지 상승하고 나면 2상 초퍼의 스위치 $IGBT1$ 과 $IGBT2$ 는 원하는 전류의 값을 유지하기 위하여 PWM 스위칭을 한다.

PWM 스위칭이 끝나면 L_a 와 L_b 에 흐르던 전류는 그림 6b에 보인 것처럼 $Diode1(Diode2)-L_a(L_b)-IGBT3-V_{a1}-V_T$ 의 경로를 구성하여 환류를 시작한다. 환류동작은 공급전류가 0이 될 때까지 계속된다. 하지만 공급전류가 0이 되기 전에 시험밸브 V_T 의 턴-오프 시 di/dt 를 모의하기 위하여 보조밸브 V_{a3} 이 턴-온 되며 그로 인해 공진전류가 주입되어 시험밸브 V_T 에는 공급전류와 공진전류가 합쳐진 형태인 I_{-V} 가 흐르게 된다. 이때의 등가회로는 그림 6c에 보인 것과 같다. 공급전류가 0이

Table 2 Operation Sequence of Each Switching Element

Time	Component	Path	
t_0	V_T	ON	$IGBT1(IGBT2)-L_a(L_b)-IGBT3-V_{a1}-V_T$
	$IGBT1$	ON	
	$IGBT2$	ON	
	$IGBT3$	ON	
	V_{a1}	ON	
	$IGBT4$	OFF	
t_1	$IGBT1$	PWM ON	$IGBT1(IGBT2)-L_a(L_b)-IGBT3-V_{a1}-V_T$
	$IGBT2$	PWM ON	
t_2	$IGBT1$	PWM OFF	$Diode1(Diode2)-L_a(L_b)-IGBT3-V_{a1}-V_T$
	$IGBT2$	PWM OFF	
t_3	$IGBT3$	ON	$Diode1(Diode2)-L_a(L_b)-IGBT3-V_{a1}-V_T$
	V_{a3}	ON	
t_4	$IGBT3$	OFF	$C-IGBT4-L_a(L_b)-IGBT1(IGBT2)-V_{in1}-V_T$
	V_{a1}	OFF	
	$IGBT4$	ON	
t_5	V_T	OFF	$C_s-V_{a3}-L_1-V_T$
	V_{a3}	OFF	
	V_{a4}	OFF	
	$IGBT4$	OFF	
t_6	$IGBT4$	OFF	$C_s-V_T-L_1-V_T$
	V_{a4}	ON	

Table 3 Circuit Parameters for Scaled Model of STC

Component	Value	Unit
V_{in1}	18	V
V_{in2}	50	V
Voltage Source	200	V
L_a, L_b	0.5	mH
C	1000	μF
L_1	8	mH
L_2	2	mH
C_s	15	μF

되면 $IGBT4$ 를 턴-온하여 V_{a1} 에 역방향 전압을 인가함으로써 V_{a1} 을 턴-오프 한다. 이때 V_{a1} 에는 $C-IGBT4-L_a(L_b)-IGBT1(IGBT2)-V_{in1}-V_T$ 의 경로를 구성하여 $V_{in2}-V_{in1}$ 만큼의 역방향 전압이 인가된다. 그림 6d는 보조밸브 V_{a1} 에 역방향 전압을 인가하는 과정을 보인 것이다. 공진전류가 0이 되면 시험밸브 V_T 와 보조밸브 V_{a3} 는 턴-오프 되며 C_s 의 전압은 그림 6e와 같이 극성이 뒤집힌다. 이후 그림 6f와 같이 보조밸브 V_{a4} 을 턴-온하여 시험밸브 V_T 에 역방향 전압을 인가하게 된다.

4. 시뮬레이션 분석

제안하는 합성시험회로의 동작과 성능을 구체적으로

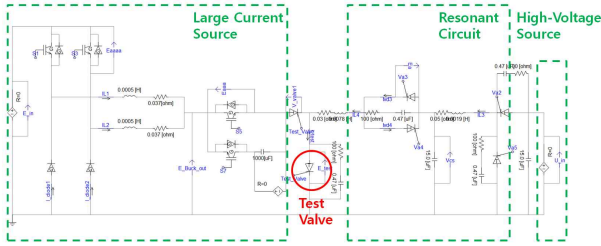
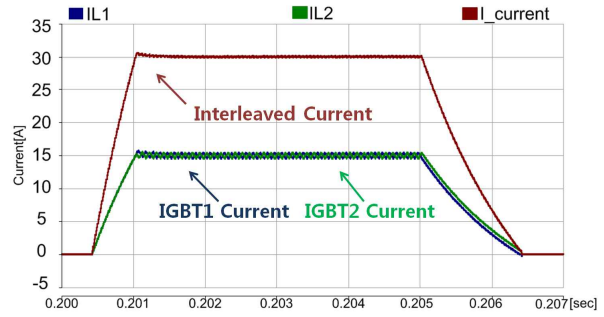


Fig. 7 Power Circuit for PSCAD Simulation

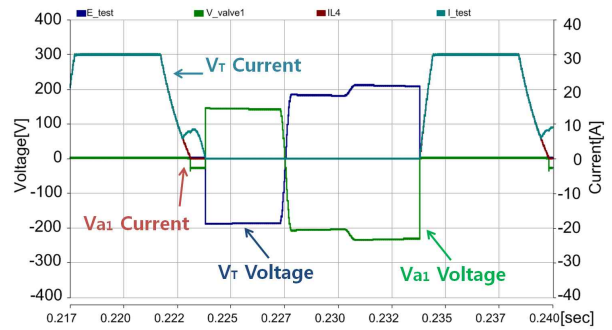
검증하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에서 분석한 합성 시험회로는 향후 하드웨어 축소모형을 이용한 실험결과와 비교하기 위해 실제 용량이 아닌 전류용량 30A, 턴-오프 전압이 200V로 축소된 회로를 대상으로 하였다. 그러나 용량을 확장할 경우 실제의 현상을 가장 잘 모의 할 수 있도록 제반 변수들을 설정하였다. 표 3은 시뮬레이션과 하드웨어 실험에 사용된 합성시험회로 축소모형의 회로정수를 나타낸 것이다.

그림 7은 시뮬레이션에 사용된 합성시험회로의 전체 전력회로를 나타낸 것이다. 전류원과 전압원 그리고 IGBT, Thyristor 등 스위칭 소자는 PSCAD에서 제공하는 내장모형을 사용하였고 각 스위칭 소자에 공급하는 게이트 펄스의 생성은 별도의 사용자정의모형을 사용하였다.

그림 8은 제안하는 합성시험회로를 이용하여 Thyristor 밸브의 턴-오프와 턴-온 동작을 분석한 시뮬레이션 결과이다. 그림 8a는 합성시험회로의 2상 초퍼에서 공급하는 전류파형을 나타낸 것이다. 2개의 전류 파형이 중첩하여 고조레벨이 감소함을 알 수 있다. 그림 8b는 시험밸브 V_T 가 턴-온 상태에서 턴-오프 되었다가 다시 턴-온 될 때 밸브에 흐르는 전류와 밸브 양단에 나타나는 전압의 파형을 나타낸 것이다. 또한 이때 보조밸브 V_{a1} 에 흐르는 전류와 밸브 양단에 나타나는 전압의 파형을 나타낸 것이다. 시험밸브에 흐르는 전류에는 공진회로 측에서 공급되는 공진전류가 중첩됨을 알 수 있고 시험밸브 양단에 나타나는 전압은 시험밸브에 흐르는 전류가 영이 됨과 동시에 역방향 전압이 걸리고 일정시간이 경과된 후 공진 커패시터의 전압극성이 전환되면서 양의 극성으로 바뀐다. 시험밸브가 턴-온 되면서 이 전압은 다시 영으로 된다. 또한 보조밸브 V_{a1} 에 흐르는 전류파형은 공진전류를 제외하고는 시험밸브의 전류와 동일하고, 전압파형은 공진회로 동작 순간에는 $V_{in2} - V_{in1}$ 에 해당하는 역방향 전압이 걸리고 그 이후에는 시험밸브에 걸리는 전압과 극성은 반대이나 유사한 파형을 보인다. 이상의 시뮬레이션 결과는 그림 2의 시험밸브의 전압-전류 파형과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 앞서 설명한대로 보조밸브 V_{a3} 가 턴-온 되는 동안 V_{a1} 에 역방향 전압이 인가됨을 확인할 수 있다.



(a) Interleaved waveform of 2-phase chopper



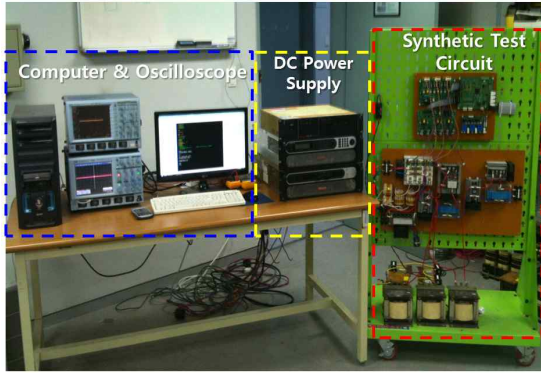
(b) Turn-off operation of V_{a1} and V_T

Fig. 8 Simulation Results for Proposed Synthetic Test Circuit

5. 축소모형 실험

시뮬레이션 결과를 바탕으로 동일한 파라미터를 갖는 하드웨어 축소모형을 제작하였다. 그림 9는 본 논문에서 제안한 새로운 합성시험회로의 하드웨어 축소모형과 이를 시험하기 위한 시험장치 구성을 나타낸 사진이다. 그림 9a는 하드웨어 축소모형의 실험을 위한 합성시험회로의 전류원과 전압원으로 사용되는 DC Power Supply를 포함한 전체 구성을 보여주고 있다. 그림 9b는 축소모형의 제어기와 IGBT와 Thyristor의 Gate Drive 회로, 그리고 센서보드를 보이고 있고 그림 9c는 시험밸브와 각종 보조밸브와 IGBT 스위칭소자, 공진회로를 구성하는 인덕터와 커패시터 등을 포함하는 전력회로를 보여주고 있다. 제어부는 중앙제어기로 DSP TMS320F28335와 A/D와 D/A 포트 그리고 통신포트 등으로 구성되어 있다.

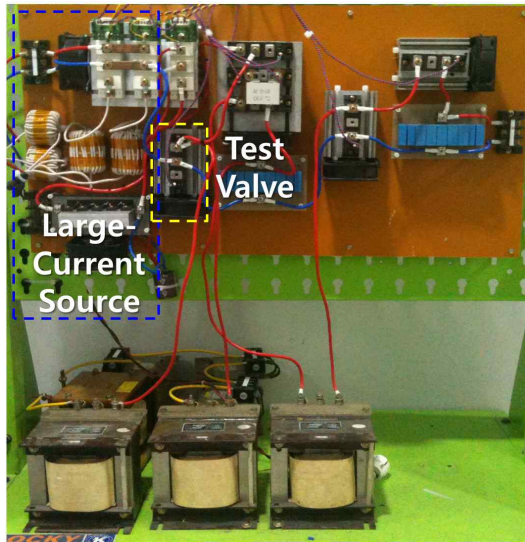
그림 10은 제안하는 합성시험회로의 축소모형을 이용한 실험 결과를 나타낸 것이다. 그림 10a는 합성시험회로의 2상 초퍼에서 공급하는 전류파형을 나타낸 것이다. Ch2는 2상 초퍼의 합성된 전류를 나타내고 Ch3과 Ch4는 각각 2상 초퍼의 IGBT1과 IGBT2에 흐르는 전류를 보여주고 있다. 실험결과를 통해 IGBT1과 IGBT2에 흐르는 전류는 180도의 위상차를 갖는 리플이 포함되어 있으나 이 두 파형이 중첩된 파형에는 리플이 대폭 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) Scaled model test setup



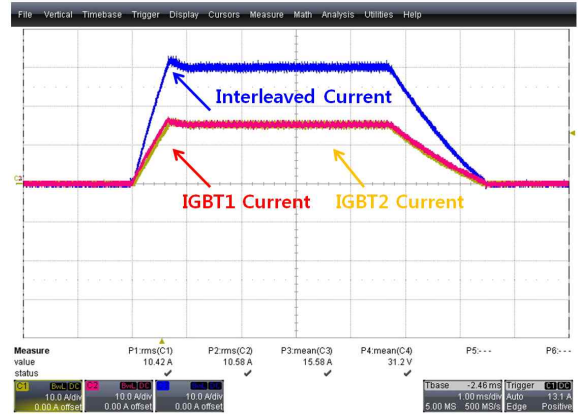
(b) Controller and gate drive



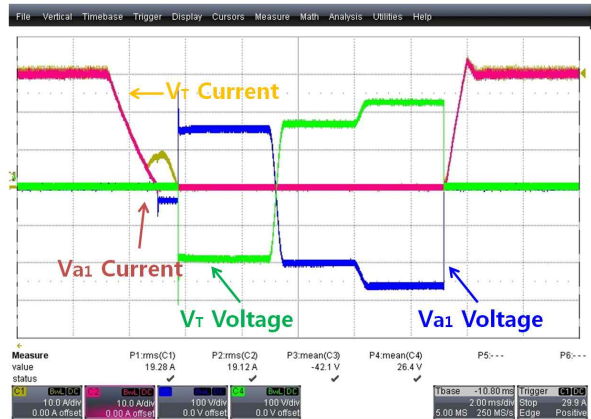
(c) Power circuit

Fig. 9 Test Set-up for Proposed Synthetic Test Circuit

그림 10b에서 Ch1은 시험밸브의 전류를 나타내고 Ch2는 보조밸브 V_{a1} 의 전류를 나타낸다. 또한 Ch3은 보조밸브 V_{a1} 의 전압을 나타내고 Ch4는 시험밸브의 전압을 나타낸다. 이들 각 파형은 그림 8에 보인 시뮬레이션 파형과 일치함을 알 수 있다. 이상의 실험결과를 통해 제안하는 시험밸브의 세 가지 동작 상태인 순방향 전도, 역방향 저지 그리고 순방향 저지 상태가 잘 모의 되고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) Inter Leaved waveform of 2-phase chopper



(b) Turn-off operation of V_{a1} and V_T

Fig. 10 Scaled-Hardware Experimental Results

6. 결 론

본 논문에서는 HVDC 시스템에서 사용되는 Thyristor 밸브의 스위칭 동작을 다양하게 테스트하는 새로운 구조의 합성시험회로를 제안하였다. 제안하는 합성시험회로는 2상 초퍼를 이용하여 턴-온 전류를 공급하고, 턴-오프 시 역방향과 순방향 전압은 기존의 인덕터, 커패시터, 보조밸브로 구성된 공진회로를 이용하는 구조로 되어있다. 제안하는 합성시험회로의 동작과 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션 모델을 개발하고 분석을 실시하였다. 또한 시뮬레이션 분석을 기반으로 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 실시하여 실제 합성시험회로를 개발하는데 활용할 수 있도록 하였다. 제안하는 합성시험회로는 기존 개발된 시스템에 비해 구조와 동작이 간단한 장점을 갖고 있어 실규모 시험설비로 확장할 경우 비용과 운영 측면에서 많은 장점이 있을 것으로 예측된다.

본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(2010T100200213)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Sampei, H. Magoroku, M. Hatano "Operating Experience of Hokkaido-Honshu High Voltage Direct Current Link," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, Jul. 1997.
- [2] U. Axelsson, A. Holm, C. Liljegren, M. Aberg, K. Eriksson, O. Tollerz, "The Gotland HVDC Light project-experiences from trial and commercial operation," *Electricity Distribution*, 2001. Part1: Contributions. CIREC. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482)
- [3] Power electronic for electrical transmission and distribution systems - Testing of thyristor valves for static VAR compensators. (IEC 61954, 1999)
- [4] Test circuits for HVDC thyristor valves. (Cigre Task Force 03 of Working Group 14.01, Technical Brochure 113, April 1997)
- [5] CH. Gao, K. P. Zha, J. L. Wen "Study on Synthetic Test Method for UHVDC Thyristor Valves," *The International Conference on Electrical Engineering* 2009.
- [6] B.L. Sheng E. Jansson A. Blomberg H-O Bjarme D. Windmar. "A New Synthetic Test Circuit For the Operational Tests of HVDC Thyristor Modules," *Paper presented at IEEE PELS APEC2001 Conference* on March 04-08, 2001, at Anaheim, USA. Conf. Proceedings pp. 1242-1246.
- [7] T. Bauer, H.P. Lips, G. Thiele, T. Tylutki, M. Uder "Operational Tests on HVDC Thyristor Modules in a Synthetic Test Circuit for the Sylmar East Restoration Project," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, Jul. 1997.
- [8] M.L. Woodhouse, T. Simanwe "A New Facility for Testing HVDC and SVC Thyristor Valves," B4-309, CIGRE 2006.

**김경태(金敬泰)**

1985년 4월 23일생. 2001년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 석사과정.

**한병문(韓炳文)**

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). Westinghouse 중앙연구소 선임연구원. 인천대 전기공학과 조교수. 현재 명지대 공과대학장 및 전기공학과 교수. 2011년 당 학회 회장.

**정재헌(鄭在憲)**

1981년 10월 19일생. 2007년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2009년 부경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 박사과정.

**노의철(魯義哲)**

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원장

**정용호(鄭容昊)**

1960년 5월 29일생. 1983년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1985년 KAIST 공대 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~1995년 미국 Wisconsin-Madison대 방문연구원. 1985년~현재 LS산전 부연구위원.

**백승택(白承澤)**

1971년 11월 24일생. 1997년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2006년~2010년 (주)효성중공연구소 연구원. 2010년~현재 LS산전 책임연구원. 당 학회 편집위원.