http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2014.19.5.399

6 직렬 연결된 ITER VS 컨버터의 시퀀스제어 비교 해석

조현식[1], 정진용[1], 조종민[1], 차한주†

Comparative Analysis of Sequence Control in Six Series-Connected ITER VS Converters

Hyunsik Jo[1], Jinyong Jeong[1], Jongmin Jo[1], and Hanju Cha†

Abstract

This study investigates the structure and operation of the ITER VS converter and proposes a sequence control method for six series-connected VS converters to reduce reactive power. The operation and the proposed sequence control method are verified through RTDS simulation. The ITER VS converter must supply voltage/current to the superconducting magnets for plasma current vertical stabilization, and the four-quadrant operation must proceed without a zero-current discontinuous section. The operation mode of the VS converter is separated into a 12- and 6-pulse circulating current and transition modes according to the size of the load current. The output voltage of the unit VS converter is limited because of the rated voltage; however, the superconducting coil must increase the operating output voltage. Thus, the VS converter must be connected in a 6-series to provide the required operating output voltage. The output voltage of the VS converters is controlled continuously; however, reactive power is limited within a minimized value of the grid. In this study, the unit converter is compared with converters connected in a 6-series to determine a suitable sequence control method. The output voltage is the same in all cases, but the maximum reactive power is reduced from 100% to 73%. This sequence control method is verified through RTDS simulation.

Key words: ITER VS converter, Sequence control, 12-pulse phase controlled rectifier, RTDS

1. 서 론

화석 연료의 고갈과 환경오염, 지구온난화에 대한 경각심이 대두되면서 친환경 에너지의 연구 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 이런 가운데 에너지 문제를 해결하기 위한 해결책으로 깨끗하고 안전한 핵융합 발전이 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. 이는 원자와 원자가 만나서 새로운 핵을 만들어 내는 반응으로써 질량결손의 개념이 적용된다. 이런 원리를 이용한 국제 핵융합 실험로(ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor)는 물의 성분인 중수소와 삼중수소를 연료로 하며 결합을 위해 1억도 이상의 고온으로 가열하면, 수소원자는 기체 상태보다 밀도가 낮은 플라즈마 형태로 변한다. 이러한 플라즈마의 제어로 인해 발생하는 에너지를 이용한 핵융합은 폐기물이 없는 무한한 에너지원이라고 말할 수 있다. 토카막 장치에서 발생된 고온의 플라즈마를 제어하기 위해서는 강력한 자장을 형성해주기 위한 다양한 대용량 전원장치가 사용되는데[1]~[3] 그중에서 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위한 VS (Vertical Stabilization)컨버터는 12펄스 위상 제어 정류기로 이루어져있다[4]. 각각의 전원장치들은 플라즈마를 제어하기 위해서 부하 전류의 급격한 정역운전을 수행할 수 있어야 한다. 하지만 스위칭 소자로 싸이리스터를 사용하기 때문에 정역 운전모드 변환과정에서 컨버터의 안전운전을 위해서 데드타임 구간을 필요로 하며, 이 과정에서 유도성 부하에 영전류 불연속 구간이 발생하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 순환전류구간을 포함하는 4상한 운전이 수행되어야 한다. 순환전류구간을 포함한 VS 컨버터의 동작 알고리즘은 기존에 많은 연구가 이루어져 왔다. 순환전류를 이용하여 안정적인 부하전류의 정·역 변환을 수행하는 부하 전류제어 알고리

Paper number: TKPE-2014-19-5-2
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electical Eng., Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895
[1] Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University
Manuscript received Mar. 13, 2014; accepted Jun. 9, 2014

즘이 연구되었고[5], 전류지령치에 따라서 전류를 추종하는 VS 컨버터의 4상한 부하 전류제어 알고리즘을 small-scaled 모델을 통하여 실험이 되었으며[6], 부하전류의 크기에 따라서 각 동작모드를 정의하고 4상한 운전을 수행하는 전압제어 알고리즘이 PSIM으로 시뮬레이션 되었다[7]. 본 논문에서는 2장에서 VS 컨버터의 구조 및 동작 원리 그리고 부하전류의 크기에 따라서 순환전류제어와 차전류제어를 포함하는 VS 컨버터의 동작모드를 구분하는 4상한 운전에 대하여 설명한다. 그리고 이를 4장에서 RTDS로 시뮬레이션하여 검증하였다.

또한 ITER VS 컨버터의 경우, 단위 컨버터의 설계 출력전압이 내부 부품의 전압사양 한계로 인하여 제한되는 데 비하여 실제 부하코일은 그 보다 더 큰 운전전압을 요구하기 때문에 6대의 VS 컨버터가 직렬로 연결되어 필요한 전압을 공급할 수 있도록 구성하여야 한다. 이 때 6직렬로 연결된 VS 컨버터는 출력전압이 플라즈마의 운전 요구조건인 -6000V~6000V를 불연속인 구간 없이 연속적으로 제어할 수 있어야 하며, 무효전력의 발생이 적어야하고 각 VS 컨버터의 싸이리스터의 점호각 변화가 최소화 되어야 한다.

직렬로 연결된 위상제어 싸이리스터 컨버터의 구조에서 각각의 컨버터들의 위상각을 제어하는 방법들을 시퀀스 제어라 부르고, 이는 다른 컨버터들은 점호각이 최소(정류기 모드)이거나 최대(인버팅 모드)로 유지를 하면서 무효전력을 최소화한 상태에서 한 컨버터가 요구되는 출력전압에 맞추어 위상제어를 하는 방식이다. 이러한 시퀀스 제어의 방법에 따라서 출력전압과 유효·무효전력의 값이 변하게 되는데, 발생하는 무효전력의 크기에 따라서 직렬로 연결된 컨버터들의 출력 용량을 변화시켜 무효전력의 감소를 시키는 방법이 있지만[8] VS 컨버터는 직렬로 연결된 각 컨버터들의 용량이 동일하기 때문에 이 방법은 적합하지 않고, 기존의 일반적인 2대 직렬의 시퀀스 제어로는 무효전력의 값은 저감할 수 있지만[9] VS 컨버터는 6직렬로 연결이 되기 때문에 2대 이상의 컨버터가 연결되었을 때에는 각 컨버터의 점호각 α의 변화를 최소화하는 스위칭 알고리즘을 적용을 해야한다. ITER 4상한 컨버터의 2직렬 small-scaled 모델로 시퀀스 제어를 사용한 무효전력을 저감하는 실험이 진행되었지만[10], 전압제어가 아닌 전류제어를 통한 실험이었으며 기존의 논문과 마찬가지로 2대 이상의 컨버터가 직렬로 연결될 경우의 시퀀스 제어 알고리즘은 소개되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 α_{min}, α_{max}, 중복값을 고려한 단일 VS 컨버터의 최소·최대의 출력전압을 기반으로 동일한 전압 지령치에서 시퀀스제어를 사용하지 않을 경우와 2개조 3대, 1개조 6대로 시퀀스 제어를 하는 3가지의 케이스에 대하여 출력전압과 무효전력의 크기를 비교 해석하였고, 6대 VS 컨버터의 점호각 α의 변화를 최소화하며 무효전력의 발생이 최소화 되는 스위칭 방법을 제안하였다. 각각의 케이스에 대하여 RTDS를 이용하여 시뮬레이션 하여 제안된 스위칭 방법이 타당함을 증명하였다.

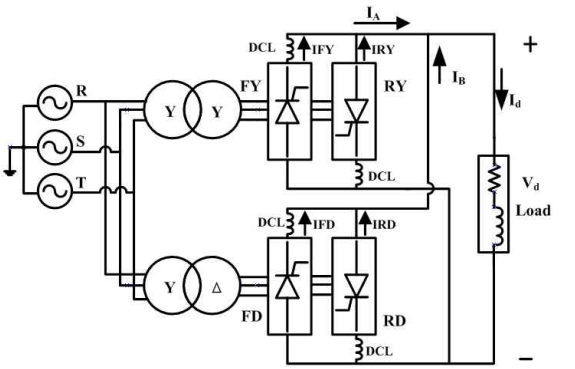


Fig. 1. Configuration of ITER VS converter.

2. ITER VS 컨버터 구조 및 동작원리

그림 1은 12펄스 위상 제어 정류기의 구성으로 이루어진 ITER VS 컨버터의 구조를 나타낸다. 12펄스로 위상을 제어하고 고조파의 영향을 저감하기 위하여 Y-Y와 Y-Δ결선의 변압기를 사용한다. 각 싸이리스터 밸브의 직류 리액터(DCL)는 순환전류를 이용한 모드에 따른 컨버터의 안정적인 정역 전환 동작을 수행할 수 있게 하고 컨버터 출력에서 단락사고 발생 시 전류가 급격히 상승하지 않도록 제한해 준다. 초전도 코일을 대신하는 더미부하에 공급되는 출력전압 V_d는 3상 AC전원측 내부와 배선상의 인덕턴스로 이루어지는 L_S에 의한 영향을 받을 수 있으며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 전압 V_{LL}은 AC전원 선간전압의 실효값을 의미하고, 전원측 인덕턴스 L_S에 의한 출력전압강하분이 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 부하전류 I_d는 각각의 밸브 출력전류인 IFY, IRY, IFD, IRD의 합과 같으며 Y측에 연결되어 있는 밸브의 전류합은 I_A로, Δ측에 연결되어 있는 밸브의 전류합은 I_B로 나타내었다. 표 1은 VS 컨버터의 파라미터들을 나타내며 주파수가 50Hz인 계통전압이 강압 변압기를 통하여 1037V로 변환되며 단일 VS컨버터의 출력전압의 범위는 ±1000V이고, 최대전류의 값은 22.5kA이다. VS 컨버터는 토카막 장치에서 발생되는 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위하여 전압 지령치를 정상적으로 추종할 수 있어야 하며, 이때 양의 최대전압(1000V)에서 음의 최대전압(-1000V)의 응답성은 20ms를 만족하여야 하고, 부하전류의 크기에 따라서 각 싸이리스터 밸브들의 동작을 구분하여 동작한다. VS 컨버터는 부하 전류의 크기에 따라서 12펄스모드, 6펄스모드, 순환전류모드로 구분되어지는데 이러한 모드를 확인하기 위하여 전압지령치를 일정주기를 가지는 구형파로 입력을 해주게 되면 앞서 구분되어진 모드에 대한 정상적인 VS 컨버터의 동작을 확인할 수 있다. 이러한 VS 컨버터의 운전모드를 그림 2에 나타내었으며, 모드 5에

TABLE I
VS CONVERTER PARAMETERS

Parameter	Value
Grid(L-L)	400kV
Main transformer(Y-Y)	Primary:400kV, Secondary:66kV
Converter transformer(Y-Y,Y-Δ)	Primary:66kV, Secondary:1037V
Converter DC reactor(DCL)	150μH
Maximum current(I_{max})	22.5kA
Commutation inductance(L_S)	32.7μH
Control Period	200μsec
Voltage reference(V_{ref})	$\pm$1000V
Load	0.001Ω, 200mH
Frequency(f)	50Hz

서는 순방향 컨버터 FY와 FD가 12펄스로 양의 전류를 부하에 공급하는 동작을 하며, 모드 -5에서는 역방향 컨버터 RY와 RD가 12펄스로 음의 전류를 부하에 공급하는 동작을 한다. 모드 3에서는 순방향 컨버터 FY가 6펄스로 양의 전류를 부하에 공급하는 동작을 하며, 모드 -3에서는 역방향 컨버터 RD가 6펄스로 음의 전류를 부하에 공급하는 동작을 한다. 모드 1과 -1은 순환전류모드를 나타내는데 순방향 컨버터 FY와 역방향 컨버터 RD를 사용하여 12펄스로 순환전류모드를 수행하며 부하전류의 안정적인 정역 전환 동작을 수행한다. VS 컨버터가 12펄스로 동작하는 +5, -5 모드에서는 Y측과 Δ측의 임피던스 차이에 의하여 컨버터 출력전류의 차이가 발생할 수 있기 때문에 차전류 제어기를 사용하여 Y측과 Δ측의 전류가 같아지도록 한다. 순환전류 모드인 +1, -1 구간에서는 순환전류 제어기가 동작을 하여 초전도 코일의 전류가 극성이 바뀔 때에도 플라즈마는 연속적이고 빠르게 제어가 될 수 있도록 한다. 식(1)로부터 출력전압 V_d가 기준전압 V_{ref}를 충족시키기 위한 점호각 α를 유도하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \omega L_S I_d \quad (1)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left\{\left(V_{ref} + \frac{3}{\pi}\omega L_S I_d\right) \cdot \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}\ V_{LL}}\right)\right\} \quad (2)$$

3. ITER VS 컨버터 6 직렬 시퀀스 제어

ITER VS 컨버터의 경우, 단위 컨버터의 설계 출력전압이 내부 부품의 전압사양 한계로 인하여 제한되는데 비하여 부하코일은 그 보다 더 큰 운전전압을 요구하므로 6대의 VS 컨버터가 직렬로 연결되어 필요한 전압을 공급할 수 있도록 구성하여야 한다. 단일 VS 컨버터의 출력전압의 요구조건이 $\pm$1000V이므로, 6 직렬로 연결시에 전체출력전압이 -6000V~6000V가 불연속인

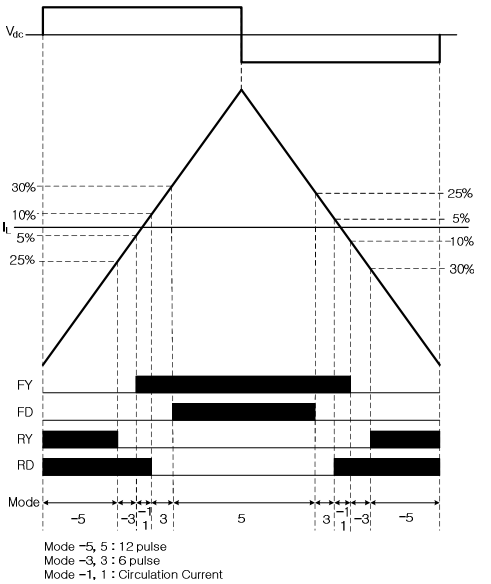


Fig. 2. Mode change according to load current.

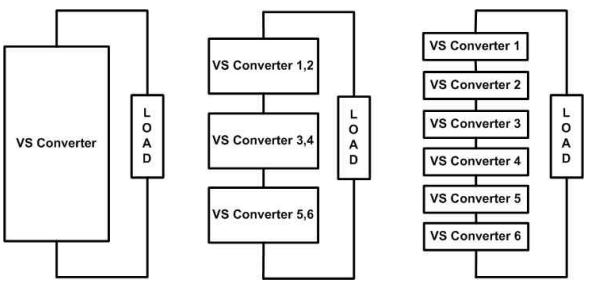


Fig. 3. Sequence control case: (a) Case 1. (b) Case 2. (c) Case 3

구간 없이 연속적으로 제어가 되도록 하여야 하며, 무효전력의 발생이 적어야하고 싸이리스터의 점호각 변화가 최소화 되어야 한다. 이를 가능하게 하기 위해서는 시퀀스제어가 요구되는데 시퀀스제어란 다른 컨버터들은 점호각이 최소(정류기 모드)이거나 최대(인버팅 모드)로 유지를 하면서 무효전력을 최소화한 상태에서 한 컨버터가 요구되는 출력전압에 맞추어 위상제어를 하는 방식이다. 출력전압을 연속적으로 제어하면서 무효전력의 발생을 줄이기 위한 시퀀스제어 방법을 해석하고 비교하기위해 대칭제어로 동작하는 단위 컨버터 1대(케이스 1), 시퀀스 제어로 동작하는 2개조 3대 직렬연결(케이스 2)과 1개조 6대 직렬연결(케이스 3)을 서로 비교 하였다. 각각의 케이스에 대한 간략한 구조도를 그림 3에 나타내었다.

ITER VS 컨버터를 직렬로 구성하게 되면 각각의 컨버터의 점호각 α를 제어하는 방식에 따라서 출력전압 V_d의 값과 유효전력 P 무효전력 Q를 효과적으로 조절할 수 있다. 그림 4은 시퀀스 제어를 사용하지 않고 대칭제어를 사용할 경우의 6개의 VS 컨버터를 직렬로 연결했을 때의 조건(케이스 1)이며 각각의 컨버터들을 동

일한 α로 제어를 할때의 출력전압과 유효·무효전력의 값을 표현한 것이다. VS 컨버터의 점호각의 최소값과 최대값을 각각 $\alpha_{\min}=15^{\circ}$, $\alpha_{\max}=137^{\circ}$으로 정해져있고, 전원측 인덕턴스 Ls에 의한 출력전압 강하분을 포함하게 되면 6직렬 연결하였을 때의 출력전압인 V_d는 -6498V～7032V까지 제어가 가능하며, 무효전력은 단위법으로 나타내게 되면 점호각 α가 90도 일 때 최대 1까지 발생할 수 있다. 이 때의 유효전력과 무효전력의 크기는 기본파만을 고려하였으며 수식으로 나타내면 식(3)～(5)와 같다. 대칭제어를 사용하면 무효전력이 최대 1까지 발생할 수 있으므로 무효전력의 크기를 줄이기 위해서는 시퀀스 제어가 필요하다.

$$S_{(1)}=1.35\,V_{LL}I_d[\cos\alpha+j\sin\alpha] \tag{3}$$

$$P_{(1)}=1.35\,V_{LL}I_d\cos\alpha \tag{4}$$

$$Q_{(1)}=1.35\,V_{LL}I_d\sin\alpha \tag{5}$$

이러한 무효전력의 크기를 감소시키기 위해서 시퀀스 제어 방법으로 본 논문에서는 2개조 3대 직렬연결(케이스 2)과 1개조 6대 직렬연결(케이스 3)을 서로 비교하였다. 그림 5는 케이스 2에 대한 출력전압과 유효·무효전력의 값을 나타낸다. 출력전압 V_d의 범위는 케이스 1과 같으나 무효전력의 최대값이 0.788로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 그림 5에 대한 출력전압의 범위에 따른 각 컨버터들의 점호각 α값을 나타낸다. 그림 6는 케이스 3에 대한 출력전압과 유효·무효전력의 값을 나타낸다. 마찬가지로 출력전압 V_d의 범위는 케이스 1, 케이스 2와 같으나 무효전력의 최대값이 0.735로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 표 3는 그림 6에 대한 출력전압의 범위에 따른 각 컨버터들의 점호각 α값을 나타낸다. 각각의 케이스에 따른 최대 무효전력은 케이스 3이 가장 적게 발생을 한다.

표 4는 각각의 케이스에 따른 출력전압의 범위, 무효전력의 최대값과 시퀀스 모드의 수를 정리한 것이다. 출력전압의 범위는 모두 같지만 무효전력의 최대값은 대칭제어를 사용하는 케이스 1이 가장 크고, 1개조 6대 직렬연결하는 케이스 3이 가장 적으며, 사용되는 시퀀스 모드의 수는 케이스 3이 6개로 가장 많다. 하지만 시퀀스 모드의 수가 많다고 해서 싸이리스터의 점호각 변화가 가장 많은 것이 아니며, 표 5는 각각의 케이스에서 출력전압에 따른 위상제어 컨버터의 수를 나타낸 것이다. 표 5에서 알 수 있듯이 케이스 1은 출력전압의 모든 구간에서 전체 컨버터들이 모두 위상제어를 하고, 케이스 2에서는 2대의 컨버터가 위상제어를 하고, 케이스 3에서는 1대의 컨버터만 위상제어를 수행하면 된다. 따라서 케이스 3이 무효전력의 감소뿐만 아니라, 싸이리스터의 점호각 변화도 최소화함을 알 수 있다.

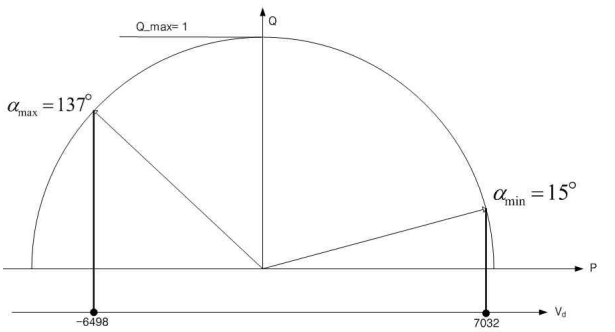


Fig. 4. Output voltage, active power and reactive power in case 1.

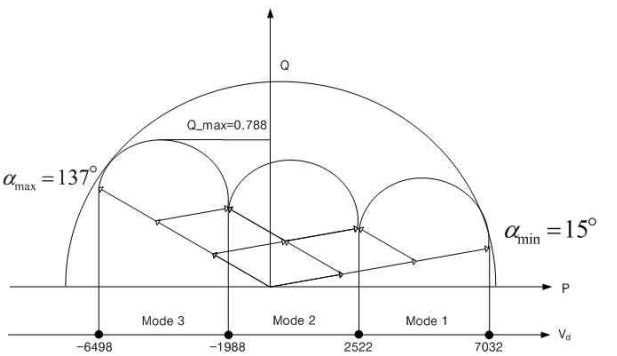


Fig. 5. Output voltage, active power and reactive power in case 2.

TABLE Ⅱ
α DISTRIBUTION ALGORITHM IN CASE 2

	VS 1,2	VS 3,4	VS 5,6	V_d(V)
Mode1	α_{min} ～ α_{max}	α_{min}	α_{min}	2522～7032
Mode2	α_{max}	α_{min} ～ α_{max}	α_{min}	-1988～2522
Mode3	α_{max}	α_{max}	α_{min} ～ α_{max}	-6498～-1988

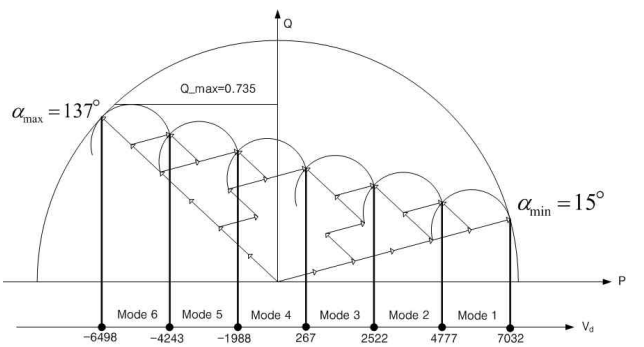


Fig. 6. Output voltage, active power and reactive power in case 3.

TABLE Ⅲ
α DISTRIBUTION ALGORITHM IN CASE 3

	VS 1	VS 2	VS 3	VS 4	VS 5	VS 6	V_d(V)
Mode1	α_{min} ~ α_{max}	α_{min}	α_{min}	α_{min}	α_{min}	α_{min}	4777~7032
Mode2	α_{max}	α_{min} ~ α_{max}	α_{min}	α_{min}	α_{min}	α_{min}	2522~4777
Mode3	α_{max}	α_{max}	α_{min} ~ α_{max}	α_{min}	α_{min}	α_{min}	267~2522
Mode4	α_{max}	α_{max}	α_{max}	α_{min} ~ α_{max}	α_{min}	α_{min}	-1988~267
Mode5	α_{max}	α_{max}	α_{max}	α_{max}	α_{min} ~ α_{max}	α_{min}	-4243~-1988
Mode6	α_{max}	α_{max}	α_{max}	α_{max}	α_{max}	α_{min} ~ α_{max}	-6498~-4243

TABLE Ⅳ
MAXIMUM VALUE OF REACTIVE POWER AND THE NUMBER OF MODE

	Output voltage(V_d)	Maximum value of reactive power	Mode
Case 1	-6498~7032	1	1
Case 2	-6498~7032	0.788	3
Case 3	-6498~7032	0.735	6

TABLE Ⅴ
THE NUMBER OF PHASE CONTROL CONVERTER ACCORDING TO OUTPUT VOLTAGE

	Output voltage(V_d)	The number of phase control converter
Case 1	-6498~7032	6
Case 2	-6498~7032	2
Case 3	-6498~7032	1

4. RTDS를 이용한 simulation 결과

2장과 3장에서 서술한 VS 컨버터의 동작과 무효전력의 감소를 위한 제안된 스위칭 기법을 검증하기 위하여 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 2장에서 서술된 VS 컨버터 1대의 각각의 모드 변환과 전압제어가 정상적으로 수행 되는 것을 확인하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. RTDS의 RSCAD를 이용하여 그린 VS 컨버터의 회로도를 그림 7에 나타

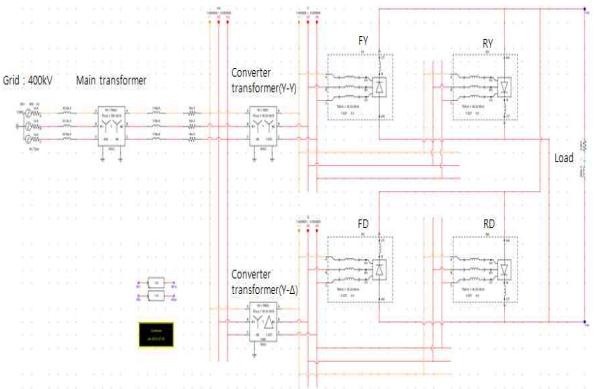
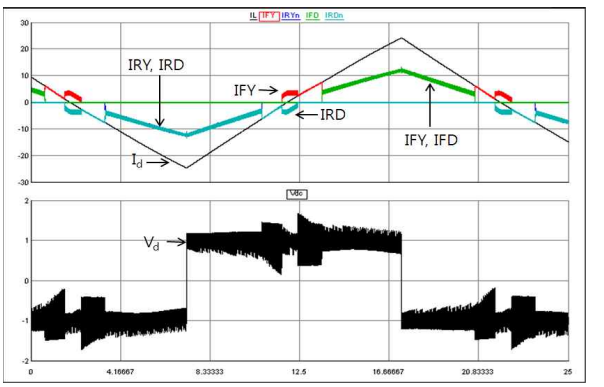
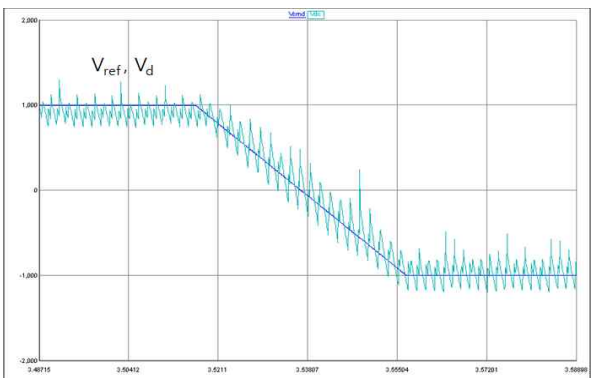


Fig. 7. VS converter RSCAD draft.



(a)



(b)

Fig. 8. VS converter voltage control: (a) I_d, IFY, IFD, IRY, IRD and V_d (b) V_{ref} and V_d

내었고, 전압제어에 따른 부하전류, 각 밸브의 전류, 출력전압의 파형을 그림 8(a)에 나타내었고, 전압지령치가 양의 최대값인 +1000V에서 음의 최대값인 -1000V로 바뀌었을때의 20ms의 응답성을 만족하는 파형을 그림 8(b)에 나타내었다. 그림 2에 표현된 부하전류의 크기에 따라서 모드전환을 정상적으로 수행하는 결과 파형을 그림 9에 나타내었다.

무효전력의 감소를 위한 시뮬레이션은 무효전력의 크기가 최대인 케이스 1과 최소인 케이스 3에 대하여 진행하였으며, 무효전력의 크기 비교에 앞서서 6직렬로 연결된 VS 컨버터가 각각의 출력전압과 전류가 정상적으

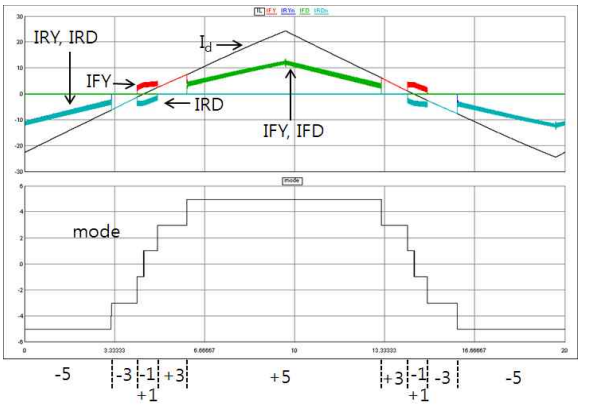


Fig. 9. VS converter voltage control and mode change.

로 제어가 되는 것을 확인한 파형을 그림 10에 나타내었다. 그림 10의 (a)~(f)는 각각의 VS 컨버터의 부하전류와 밸브 전류들을 나타내며, 그림 10의 (h)~(m)은 각각의 VS 컨버터의 출력전압을 나타내고 이들의 합은 그림 10의 (g)로 나타난다. 시퀀스 제어에 대한 출력전압과 무효전력의 감소를 증명하기 위하여 전압 지령치가 +6000V에서 -6000V까지 변할 때의 동일한 조건에서 시뮬레이션 하였다. 그림 11은 케이스 1에서 전체 출력전압과 각 VS 컨버터의 전압이 연속적인 제어가 되는 것을 확인하기 위한 파형이다. 각각의 컨버터가 동일한 α를 가지고 운전을 하기 때문에 전압 지령치에 따라서 각각의 컨버터의 출력전압이 동일하게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 불연속 구간 없이 전압 지령치에 따른 출력전압 V_d를 제어하는 것을 확인할 수 있다. 그림 11(a)는 전체 출력전압 V_d로서 그림 11의 (b)~(g)의 합과 같다. 그림 12는 케이스 3에서 같은 전압 지령치에서 전체 출력전압과 각 VS 컨버터의 전압이 연속적인 제어가 되는 것을 확인하기 위한 파형이며, 표 3에서 나타내어진 시퀀스 모드에 따라서 각각의 컨버터의 α가 변하여 출력전압이 순차적으로 변하는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 컨버터들은 전압 지령치를 정상적으로 추종하는 것을 확인할 수 있다. 케이스 1의 무효전력의 변화를 나타낸 파형을 그림 13에 나타내었고, 각각의 컨버터가 동일한 α를 가지고 운전을 하기 때문에 무효전력의 변화도 각각의 컨버터들은 같게 나타난다. 따라서 전체의 무효전력을 나타내는 그림 13(g)는 각 컨버터들의 무효전력의 합으로써 그림 13(a)~(f)의 합과 같다. 이 때의 무효전력의 크기는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고, 이는 그림 4에 나타낸 무효전력의 변화와 일치한다. 그림 14에서는 케이스 3의 무효전력의 변화를 확인할 수 있다. 그림 6에 나타낸 무효전력의 변화와 같이 시퀀스 모드에 따라서 각각의 컨버터의 α가 변하기 때문에 전체의 무효전력을 나타낸 그림 14(g)는 케이스 1과는 달리 무효전력의 합은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

$$Q = |V_d \times I_d \times \tan\alpha| \tag{6}$$

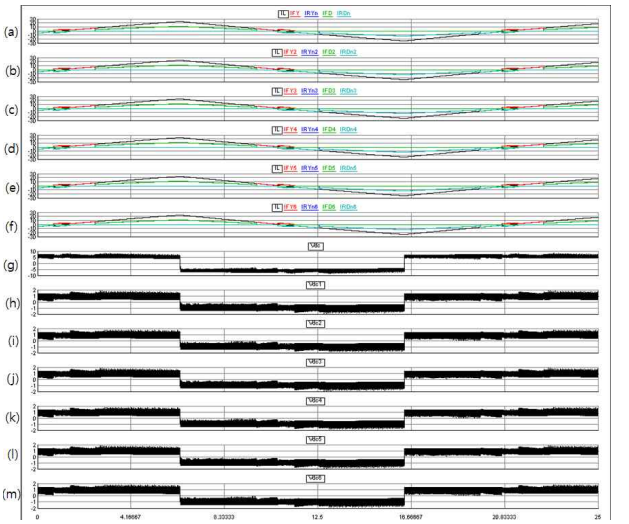


Fig. 10. Waveform of 6 series connected VS converters: (a)~(f) Current of each VS converter. (g) Summation of output voltage Vd. (h)~(m) output voltage of each VS converter.

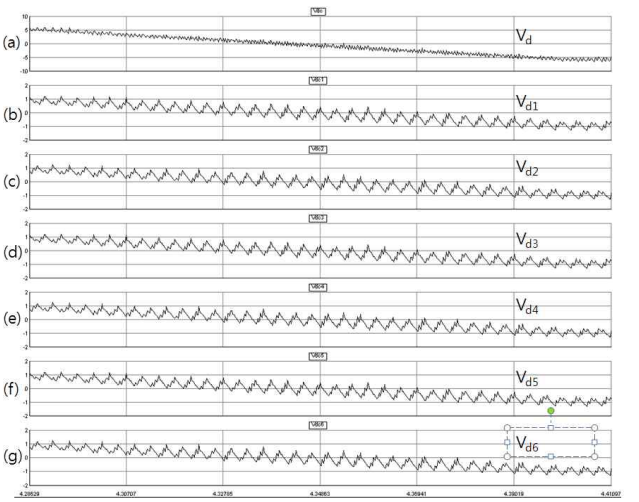


Fig. 11. Output voltage variation in case 1: (a) V_d. (b) V_{d1}. (c) V_{d2}. (d) V_{d3}. (e) V_{d4}. (f) V_{d5}. (g) V_{d6}.

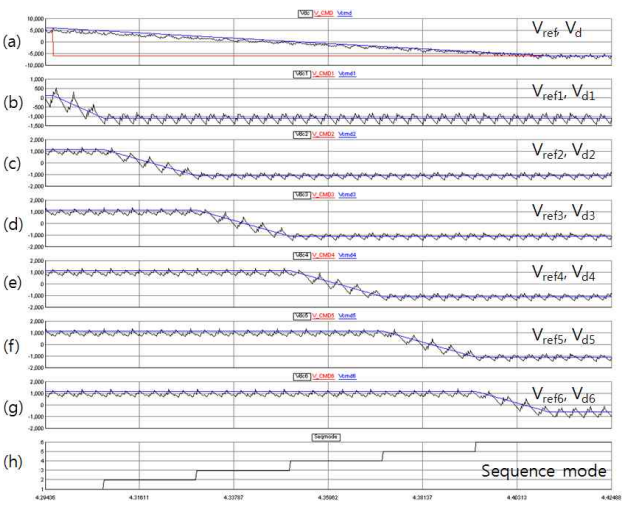


Fig. 12. Output voltage variation in case 3: (a) V_D. (b) V_{D1}. (c) V_{D2}. (d) V_{D3}. (e) V_{D4}. (f) V_{D5}. (g) V_{D6}. (h) Sequence mode.

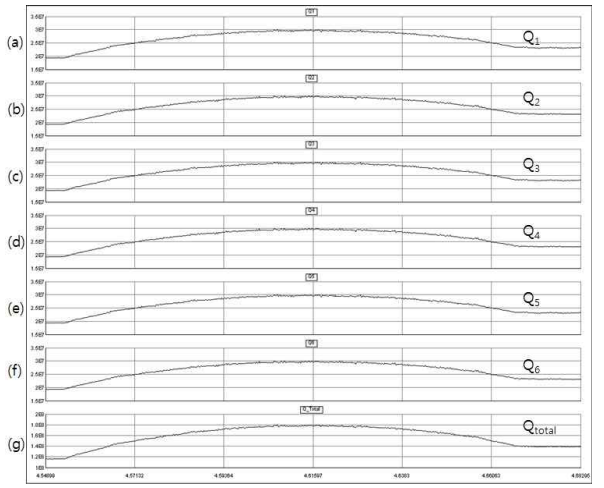


Fig. 13. Reactive power variation in case 1: (a) Q_1, (b) Q_2, (c) Q_3, (d) Q_4, (e) Q_5, (f) Q_6, (g) Sum of reactive power.

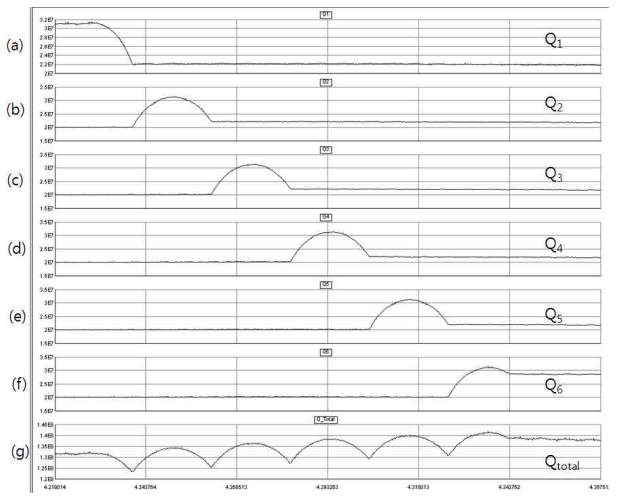


Fig. 14. Reactive power variation in case 3: (a) Q_1, (b) Q_2, (c) Q_3, (d) Q_4, (e) Q_5, (f) Q_6, (g) Sum of reactive power.

5. 결 론

본 논문에서는 ITER VS 컨버터의 구조와 동작 알고리즘 그리고 6 직렬 연결된 VS 컨버터의 시퀀스 제어 비교 해석에 대하여 서술하였고 VS 컨버터의 동작 알고리즘과 6 직렬 연결시에 발생하는 무효전력의 최소값을 갖는 스위칭 방식을 RTDS를 통하여 시뮬레이션 하였다. VS 컨버터는 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위하여 전압과 전류를 공급해야 하며, 4상한 운전을 통하여 영전류 구간이 발생하지 않아야 한다. 이를 위하여 순환전류 구간을 포함하여 부하전류의 크기에 따라서 모드를 구분한 알고리즘을 적용하였고, 이를 RTDS를 통하여 시뮬레이션 하여 확인 하였다. 내부부품의 전압 사양 한계로 인하여 VS 컨버터는 직렬로 구성되어 부하코일에 전압을 공급하게 되는데, 각각의 컨버터를 제어하는 방식에 따라 출력전압과 유효·무효전력의 값이 변하게 된다. 본 논문에서는 α_{min}, α_{max}, 중복값에 대하여 세 가지의 케이스를 비교하였다. 모든 케이스에서 출력전압인 V_d의 값은 동일하지만 무효전력은 시퀀스 제어를 할 경우 각각 22%, 27% 감소하며, 무효전력의 크기가 최소가 되는 스위칭 방법을 제안하였고, 이를 RTDS 시뮬레이션을 통하여 검증하여 확인 하였다.

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

References

[1] J. W. Choi, “ITER Superconducting Magnet Power Supply System,” *KIPE Magazine*, Vol. 17, No. 4, pp. 33-38, Aug. 2012.

[2] C. Neumeyer, I. Benfatto, J. Hourtoule, J. Tao, A. Mankani, F. Milani, S. Nair, I. Suh, H. Tan, M. Wang, J.S. Oh, A. Roshal, “ITER Power supply innovations and advances,” *Fusion Engineering(SOFE), 2013 IEEE 25th Symposium*, pp. 1-8, 2013.

[3] J. Goff, I. Benfatto, J. Tao, I. Yonekawa, K. C. Hwang, J.B. Kang, H.G. Kim, J.S. Oh, E. Seo, J.H. Suh, “Control and instrumentation of the ITER coil power supply system,” *Control and Automation 2013, Uniting Problems and Solutions, IET Conference*, pp. 1-6, 2013.

[4] E. Gaio, R. Piovan, V. Toigo, I. Benfatto, “The control system of the ITER vertical stabilization converter,” *22nd Symposium on Fusion Technoloy*, pp. 719-725, Sep. 2003.

[5] G. B. Chung, J. K Ji, H. S. Mok, “Output control of ITER vertical stabilization converter with circulating current technique,” *Trans. KIPE*, Vol. 14, No. 5, pp. 379-386, Oct. 2009.

[6] J. H. Suh, J. S. Oh, J. Choi, E. H. Song, G. S. Lee, K. S. Eom, J. Goff, J. Tao, P. Fu, “Korean R&D on the converter controller for ITER AC/DC converters,” *Fusion Engineering(SOFE), 2011 IEEE/NPSS 24th Symposium*, pp. 1-5, 2011.

[7] C. Lee, H. Liu, K. Hwang, S. Lee, H. Park, C. Kim, J.S. Oh, J.H. Suh, J. Choi, “A novel control for four-quadrant operation of ITER VS converter,” *Electrical Machines and Systems(ICEMS), 2013 International Confrence*, pp. 1657-1661, 2013.

[8] S. Mukhopadhyay, “A new concept for improving the performance of phase-controlled converters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-14, No. 6, pp. 594-603, Nov./Dec. 1978.

[9] E. P. Wiechmann, R. P. Burgos, J. Holtz, “Sequential connection and phase control of a high-current rectifier optimized for copper electrowinning applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 4,

pp. 734-743, 2000.
[10] H. S. Heo, K. W. Park, I. C. Jeong, H. S. Shin, J. A Park, Y. W. Lee, J. W. Choi, J. S. Oh, J. H. Suh, "Sequence control of small-scaled ITER power supply for reactive power compensation," *Industrial Technology(ICIT), 2010 International Conference*, pp. 813-817, 2010.

조현식(曺賢植)
1987년 2월 18일생. 2011년 충남대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

정진용(鄭鎭庸)
1986년 12월 29일생. 2012년 충남대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

조종민(趙鐘珉)
1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

차한주(車翰周)
1965년 11월 20일생. 1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수.