

6 직렬 연결된 ITER VS 컨버터의 시퀀스 제어 비교 해석

조현식, 서재학*, 차한주
 충남대학교, 국가핵융합연구소*

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

HyunSik Jo, Jae Hak Suh*, Hanju Cha
 Chungnam National University, National Fusion Research Institute*

ABSTRACT

본 논문에서는 6 직렬 연결된 ITER VS 컨버터의 시퀀스 제어 비교 해석에 대하여 서술하였다. 소자의 가용성이나 크기 등의 한계로 인하여 여러개의 싸이리스터 정류기를 직렬로 연결하게 되는데 이때 각각의 컨버터를 제어하는 방식에 따라 출력전압과 유효·무효전력의 값이 변하게 된다. 본 논문에서는 α_{min} , α_{max} , 중복값에 대하여 시퀀스제어를 사용하지 않을 경우와 2개조 3대와 1개조 6대로 시퀀스 제어를 하였을 때를 비교하였다. 모든 경우에서 출력전압인 V_d 의 값은 동일하지만 무효전력은 시퀀스 제어를 할 경우 각각 22%, 27%감소 하였으며, 6대 싸이리스터 정류기들의 점호각 α 의 변화를 최소화하는 스위칭 방법을 제안하였다.

1. 서론

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 열핵융합실험로(ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor)는 주변에서 쉽게 구할 수 있는 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 사용되는 그중에서 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위한 VS(Vertical Stabilization)컨버터는 12 펄스 위상 제어 정류기로 이루어져있다^[1]. 부하가 요구하는 전압을 원활하게 공급하기 위해서 VS컨버터는 직렬구조로 연결이 된다. 이때 각각의 컨버터들의 위상각을 제어하는 방법에 따라서 출력전압과 유효·무효전력의 값이 변하게 된다^[2]. 본 논문에서는 α_{min} , α_{max} , 중복값에 대하여 시퀀스제어를 사용하지 않을 경우와 2개조 3대와 1개조 6대로 시퀀스 제어를 하였을 때를 비교하였고, 6대 싸이리스터 정류기들의 점호각 α

의 변화를 최소화하는 스위칭 방법을 제안하였다.

2. 12펄스 위상제어 싸이리스터 정류기의 시퀀스 제어

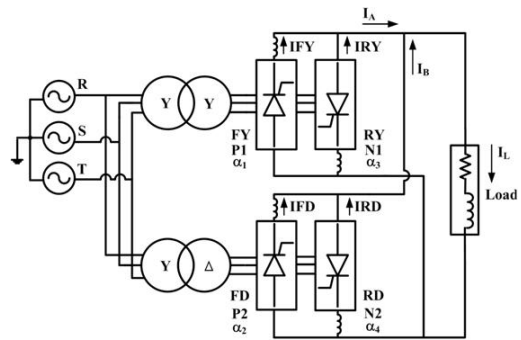


그림 1 VS 컨버터의 구조

그림 1은 12펄스 위상 제어 정류기의 구성으로 이루어진 VS컨버터의 구조를 나타낸다. 12펄스로 위상을 제어하기 위해 Y Y와 Y Δ결선의 변압기를 사용하고, 각 변압기의 2차측 결선을 Y와 Δ로 하여 30도의 위상차를 갖게 한다. R L 부하에 걸리는 출력전압 V_d 는 3상 AC전원측 내부와 배선상의 인덕턴스로 이루어지는 L_s 에 의한 영향을 받을 수 있으며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 전압 V_{LL} 은 AC전원 선간전압의 실효값을 의미하고, 전원측 인덕턴스 L_s 에 의한 출력전압강하분이 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

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

식(1)로부터 출력전압 V_d 가 기준전압 V_{ref} 를 충족시키기 위한 점호각 α 를 유도하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

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

2.1 시퀀스제어

이러한 컨버터를 직렬로 구성하게 되면 각각의 컨버터의 점호각 α 를 제어하는 방식에 따라서 출력전압 V_d 의 값과 유효전력 P 무효전력 Q를 효과적으로 조절할 수 있다. 표1은 VS 컨버터의 사양 및 설정 값을 나타낸다. 그림2는 시퀀스 제어를 사용하지 않고 6개의 컨버터를 직렬로 연결했을때의 조건이며 각각의 컨버터들이 동일한 α 로 제어를 할때의 출력전압과 유효·무효전력의 값을 나타낸 것이다. 점호각의 최소값과 최대값을 각각 $\alpha_{min} = 15^\circ$, $\alpha_{max} = 138^\circ$ 으로 정하고, 전원측 인덕턴스 L_s 에 의한 출력전압 강하분을 포함하게 되면 출력전압인

V_d 는 6498~7032까지 제어가 가능하며, 무효전력은 단위법으로 나타냈을 때 최대 1까지 발생할 수 있으므로 무효전력의 크기를 줄이기 위해서는 시퀀스 제어가 필요하다. 이때 유효전력과 무효전력의 크기는 기본파만을 고려하였으며 수식으로 나타내면 식(3)~(5)와 같다.

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

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

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

이러한 무효전력을 감소시키기 위해서 시퀀스제어를 사용하게 되는데 본 논문에서는 2개조 3대 직렬연결과 1개조 6대 직렬연결을 서로 비교하였다. 그림3은 2개조 3대 직렬연결에 대한 출력전압과 유효·무효전력의 값을 나타낸다. 출력전압 V_d 의 범위는 같으나 무효전력의 최대값이 0.788로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 표2는 그림3에 대한 출력전압의 범위에 따른 각 컨버터들의 α 값을 나타낸다. 그림4는 1개조 6대 직렬연결에 대한 출력전압과 유효·무효전력의 값을 나타낸다. 마찬가지로 출력전압 V_d 의 범위는 같으나 무효전력의 최대값이 0.735로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 표4는 그림4에 대한 출력전압의 범위에 따른 각 컨버터들의 α 값을 나타낸다

표 1 VS 컨버터 사양 및 설정값

| Parameter | Value |
|---------------------|---------------------|
| Grid(L L) | 400kV |
| 주변압기(Y Y) | 1차측:400kV, 2차측:66kV |
| 컨버터 변압기 (Y Y,Y Δ) | 1차측:66kV, 2차측:1037V |
| 컨버터 DCL | 150μH |
| I_{max} | 25kA |
| 전원측 L_s | 32.7μH |
| Control Period | 200μsec |
| 전압 지령치(V_{ref}) | ±1000V |
| 부하(Load) | 0.001Ω, 200mH |
| 주파수(f) | 50Hz |

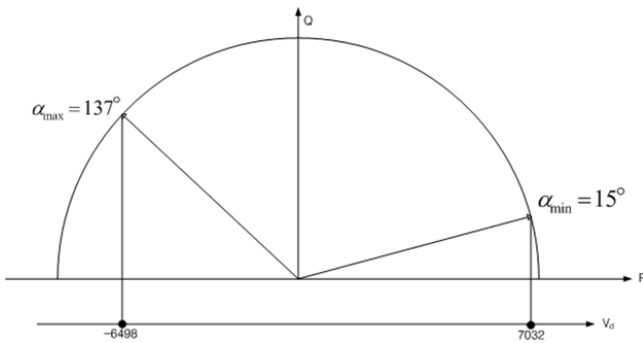


그림 2 대칭 제어조건에서의 출력전압과 유효·무효전력

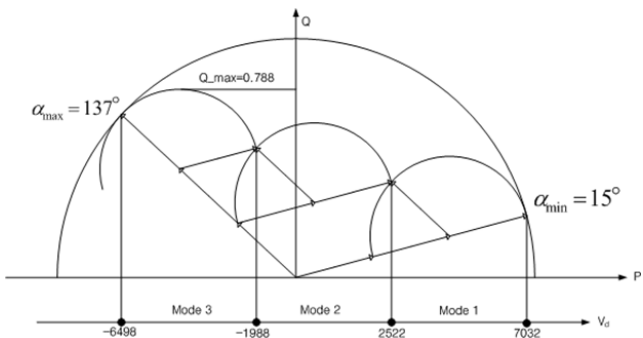


그림 3 2개조 3대연결 시퀀스제어의 출력전압과 유효·무효전력

표 2 2개조 3대 직렬연결에 대한 출력전압과 컨버터의 α 값

| | VS 1,2 | VS 3,4 | VS 5,6 | V_d |
|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Mode1 | α_{min} | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | 2522 ~ 7032 |
| Mode2 | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | 1988 ~ 2522 |
| Mode3 | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | α_{max} | 6498 ~ 1988 |

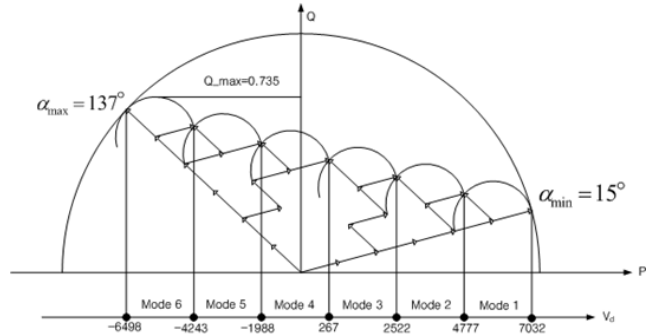


그림 4 1개조 6대연결 시퀀스제어의 출력전압과 유효·무효전력

표 3 1개조 6대 직렬연결에 대한 출력전압과 컨버터의 α 값

| | VS 1 | VS 2 | VS 3 | VS 4 | VS 5 | VS 6 | V_d |
|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Mode1 | α_{min} | α_{min} | α_{min} | α_{min} | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | 4777 ~ 7032 |
| Mode2 | α_{min} | α_{min} | α_{min} | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | 2522 ~ 4777 |
| Mode3 | α_{min} | α_{min} | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | α_{max} | 267 ~ 2522 |
| Mode4 | α_{min} | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | α_{max} | α_{max} | 1988 ~ 267 |
| Mode5 | α_{min} | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | α_{max} | α_{max} | α_{max} | 4243 ~ 1988 |
| Mode6 | $\alpha_{min} \sim \alpha_{max}$ | α_{max} | α_{max} | α_{max} | α_{max} | α_{max} | 6498 ~ 4243 |

3. 결론

본 논문에서는 6 직렬 연결된 ITER VS 컨버터의 시퀀스 제어 비교 해석에 대하여 서술하였다. 여러대의 싸이리스터 정류기를 직렬로 연결하게 되면 각각의 컨버터를 제어하는 방식에 따라 출력전압과 유효·무효전력의 값이 변하게 된다. 본 논문에서는 α_{min} , α_{max} , 중복값에 대하여 시퀀스제어를 사용하지 않을 경우와 2개조 3대와 1개조 6대로 시퀀스 제어를 하였을 때를 비교하였다. 모든 경우에서 출력전압인 V_d 의 값은 동일하지만 무효전력은 시퀀스 제어를 할 경우 각각 22%, 27% 감소 하였으며, 6대 싸이리스터 정류기들의 점호각 α 의 변화를 최소화하는 스위칭 방법을 제안하였다

참고 문헌

- [1] 최정완, "ITER 초전도자석 전원계통", 전력전자학회지, 제17권 제4호, pp 33 38, 2012 08
- [2] SUBHAS MUKHOPADHYAY, "A New Concept for Improving the Performance of Phase Controlled Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 1A 14, No 6, November/December 1978, pp 594 603