

계통 과도안정도 향상을 위한 전압형 컨버터의 출력범위 증가 운전기법

이승용, 정재정
경북대학교

VSC Output Range Extension Schemes for Improving Power System Transient Stability

Seungyong Lee, Jae-Jung Jung
Kyungpook National University

ABSTRACT

전압형 컨버터는 전력 공급의 4상한 운전이 가능하여 전력 계통과 연계하기 용이하며 전력 조류를 계통 상황에 맞게 적절히 제어할 수 있다. 특히 전압형 컨버터의 무효전력 공급이 가능한 특성은 계통의 과도안정도 향상에 도움을 줄 수 있지만 전압형 컨버터의 합성 전압 제한에 의해 무효전력 공급은 컨버터의 최대 공급 가능 능력보다 제한되게 된다. 하지만, 컨버터의 적절한 제어 방식을 통해 컨버터 출력 전압을 증가시킴으로써 무효전력 공급을 늘릴 수 있고 이를 통해 계통의 고장 상황 시 과도안정도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 전압형 컨버터의 출력 전압 크기에 따른 무효 전력 출력의 크기를 분석하고 시뮬레이션을 통해 무효전력 공급의 증가 및 계통의 과도 안정도의 향상을 확인하였다.

1. 서론

신재생 에너지원의 증가와 같은 이유로 전력 계통에 연계되는 전압형 컨버터는 그 수와 규모가 늘어나고 있으며 계통을 안정적으로 운영하는데 도움을 줄 수 있다. 이러한 안정도의 증가는 전압형 컨버터가 4 상한 운전이 가능하여 계통의 상황에 유연하게 대처할 수 있기 때문이다. 특히, 계통의 무효전력 공급 확보는 계통의 과도 안정도를 향상시킬 수 있다. 하지만 컨버터의 무효전력 공급능력은 컨버터의 최대 전압 합성 가능 크기에 의해 결정되며 이는 DC 단 전압에 의해 제한된다[2]. 컨버터의 전압합성 방법으로는 삼각파 비교변조방식 (Sinusoidal PWM; SPWM), 3 고조파 주입 전압변조방식 (Third Harmonic Injection PWM; THIPWM), 공간벡터 전압변조방식 (Space Vector PWM; SVPWM) 등이 있으며, THIPWM과 SVPWM의 경우에는 SPWM에 비하여 동일한 DC단 전압을 이용하여 최대치가 약 15.5% 더 큰 선형적인 AC 출력전압을 합성할 수 있다[3]. 한편, 계통의 불안정 시에는 선형적인 AC 전압합성을 벗어나 컨버터의 최대 가능 전압 합성 방법인 6-step 운전을 이용하여 계통의 안정도 향상에 도움을 줄 수 있다. 따라서, 계통 불안정 상황에서는 적절한 과변조 방식을 통해 6-step 운전으로 전환하여 출력 전압의 범위를 증가적으로 확장시킴으로써 무효전력 공급을 증가시킬 수 있다.

전력 계통의 안정도를 평가하는 요소 중 과도 안정도(transient stability)는 전력 계통의 고장 등의 외란에서 발전기들 간 동기를 유지하는 발전기와 계통의 복원능력이다.[1] 이러한 과도 안정도의 평가는 임계고장제거시간(critical clearing time; CCT)를 확인함으로써 평가할 수 있으며 CCT가 높을 수록 계통의 안정도가 높다

고 평가할 수 있다. 본 논문에서는 위에서 언급한 전압합성법을 통하여 컨버터의 무효전력을 공급 능력을 확대시키는 경우, CCT의 증가를 확인하고 이를 통한 계통의 안정도 향상을 확인하였다.

2. 전압형 컨버터의 합성 전압 크기에 따른 무효전력 공급 능력 분석

2.1 컨버터와 계통 간 전력 조류 분석

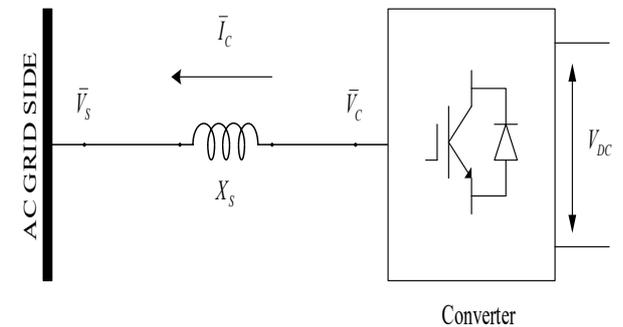


그림 1. 전압형 컨버터의 계통 연계 단선도

계통 연계형 컨버터는 AC계통, 컨버터와 계통을 연결하는 임피던스, 전압형 컨버터와 DC전압으로 구성되어 있으며 그림 1과 같이 단선도로 표현될 수 있다. 전압형 컨버터는 일정 범위 내에서 전압의 크기와 위상을 제어할 수 있는 전압원으로 모델링 할 수 있다. 컨버터를 전압원으로 모델링 할 경우 컨버터와 계통 사이의 전력 조류(power flow)를 수식으로 표현할 수 있다. 계통측 전압의 위상을 0으로 설정하고, 컨버터 합성 전압은 δ 만큼의 위상차를 가지고, 송전 선로의 임피던스는 순수 유도성 리액턴스로 구성되어 있다고 가정하였으며, 아래와 같이 컨버터로부터 계통에 주입되는 전력을 수식으로 표현할 수 있다.

$$\bar{S}_s = \bar{V}_s \left(\frac{\bar{V}_c - \bar{V}_s}{jX_s} \right)^* = V_s \left(\frac{V_c e^{j(\delta - \frac{\pi}{2})} - V_s e^{j(-\frac{\pi}{2})}}{X_s} \right)^* \quad (1)$$

$$Re(S_s) = P_s = \frac{V_s \cdot V_c}{X_s} \sin(\delta) \quad (2)$$

$$Im(S_s) = Q_s = -\frac{V_s^2}{X_s} + \frac{V_s \cdot V_c}{X_s} \cos(\delta) \quad (3)$$

그림 1과 수식 (1)~(3)에서 \bar{S}_S 는 컨버터에 의해 계통으로 주입되는 피상전력이며 \bar{V}_S 는 컨버터와 연결된 계통의 전압, \bar{I}_C 는 컨버터와 계통의 전압차에 의한 전류, X_S 는 계통과 컨버터 사이의 리액턴스를 의미한다. 수식 (2)~(3)을 통해 계통으로 주입되는 무효전력과 유효전력의 크기를 계산할 수 있으며 컨버터 출력 전압의 위상과 크기를 제어함으로써 유효전력과 무효전력의 출력을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 컨버터의 합성 전압에 따른 전력 공급 능력 분석

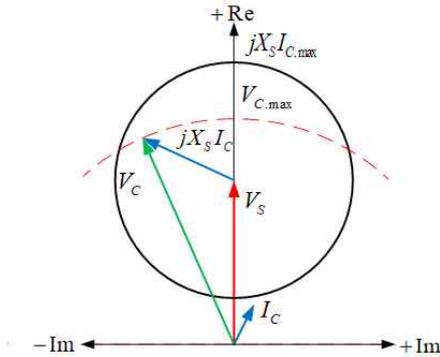


그림 2. 출력 전압 제한에 의한 전류 제한

컨버터의 합성 전압의 제한으로 인해 그림 2와 같이 컨버터의 허용 전류 I_C 보다 더 낮은 전류로 컨버터를 운용하게 되며 이는 곧 출력 전력의 제한을 의미한다. 이러한 출력의 제한은 수식 (2)~(3)을 이용하여 컨버터의 합성 전압 제한에 의한 전력 공급 능력의 제한을 계산할 수 있다. 컨버터의 전압 합성 방법은 선형 변조 영역에서 SPWM, SVPWM, 과변조 영역에서 6-step으로 세 가지 경우에 대하여 분석하였고, 모든 전압 합성 방법은 컨버터의 DC 전압을 최대도 이용할 때를 고려하였으며 기본파 성분과 고조파 성분만 분석하였다. 분석에 사용된 파라미터는 표 1과 같으며, MATLAB으로 각 합성 전압에 대한 출력을 계산한 결과 SPWM에 비해 SVPWM 변조 방식의 출력이 285.4% 증가하였고 6-step 방식의 출력은 333.3% 증가하였고 이를 그림 3과 같이 나타내었다. 이를 통해 정해진 DC 전압에서 적절한 선형변조 혹은 과변조 방식을 채택함으로써 컨버터의 출력범위 내에서 무효전력의 출력을 증가시켜 운용할 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 컨버터 출력 계산 파라미터

| 파라미터 | 값 |
|--------------|-----------|
| 컨버터 정격 | 400[MVA] |
| 계통 선간 rms 전압 | 300[kV] |
| 컨버터 DC 전압 | 400[kV] |
| 송전 선로 리액턴스 | 0.3 pu[Ω] |

2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 컨버터의 전압 출력과 무효전력 공급의 변화에 대한 컨버터 시뮬레이션 결과와 전력 계통에 전압형 컨버터가 적용되어 3상 지락 사고 시 최대 출력 범위의 무효전력을

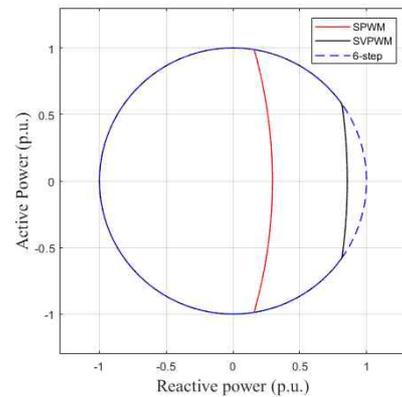


그림 3. 전압 합성방법에 따른 컨버터 출력

공급하였을 때의 임계고장 제거시간을 확인하는 전력 계통 시뮬레이션에 대한 결과로 총 두 가지 결과가 있다. 이 두 가지 결과를 통해 컨버터의 적절한 변조 방식이 계통의 과도안정도를 향상시킬 수 있는지 경향성을 검증하였다.

2.3.1 컨버터 시뮬레이션

컨버터 시뮬레이션은 표 2와 같은 전압형 컨버터 파라미터를 바탕으로 PSIM을 이용하여 진행하였다. 전압 변조 방식은 선형변조 영역에선 SVPWM을 이용하였고 과변조 영역에선 구형파 제어를 이용하였으며 각 변조 방식에 따른 무효전력 출력을 확인하였다. 시뮬레이션 상 3초에서부터 과변조를 시작하였으며 결과는 그림 4와 같다. 컨버터의 DC Link 전압을 모두 이용하였어도 컨버터의 정격인 400MVA를 이용할 수 없지만 과변조를 통해 출력 전압을 증가적으로 높게 전압을 합성하였을 경우에는 컨버터의 출력 범위를 모두 사용할 수 있는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있다.

표 2. 컨버터 시뮬레이션 파라미터

| 파라미터 | 값 |
|--------------|----------|
| 컨버터 정격 | 400[MVA] |
| 계통 선간 rms 전압 | 260[kV] |
| 컨버터 DC 전압 | 400[kV] |
| 송전 선로 리액턴스 | 52.6[mH] |
| 송전 선로 저항 | 367[mΩ] |

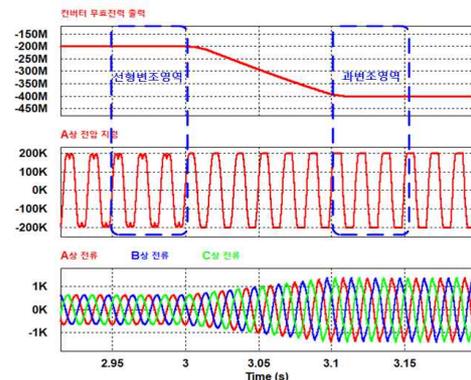


그림 4. 컨버터 시뮬레이션 결과

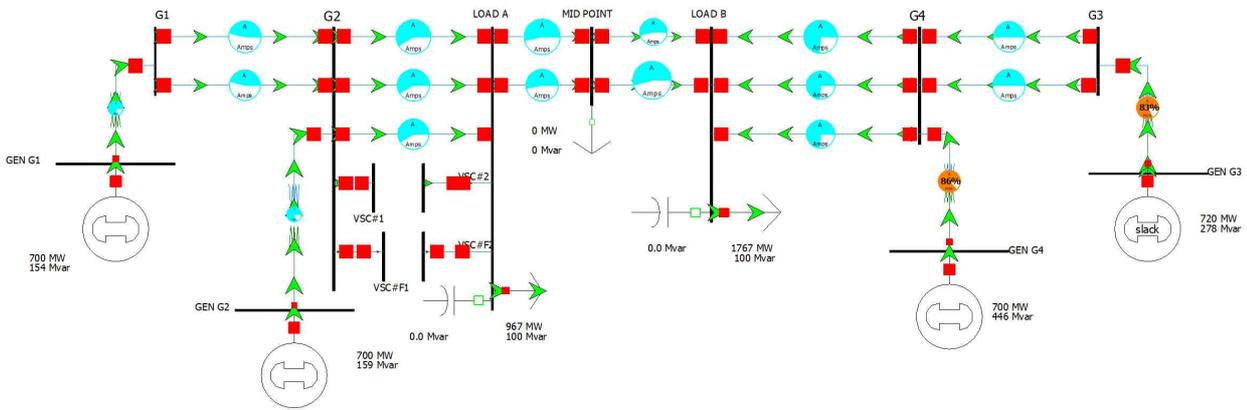


그림 5. 전력 계통 시뮬레이션 단선도

3. 결론

2.3.2 전력 계통 시뮬레이션

전력 계통 시뮬레이션은 Power World를 사용하였고 그림 5와 같이 4개의 발전기가 2개 지역의 부하를 분담하는 형태로 2개 지역은 송전 선로를 통해 연결되어 있다. 전압형 컨버터는 정격을 400MVA 급으로 설정하였으며 적절한 전압 변조를 통해 정격만큼의 출력을 낼 수 있다고 가정하였으며 그림의 좌측 지역에서 송전을 담당하고 있는 형태이다. 여기서 2개 지역을 연결하는 송전 선로에서 시뮬레이션상 1초의 시간에서 3상 지락 사고가 발생하였을 때의 전압형 컨버터에서 공급하는 무효전력 크기에 따라 CCT의 변화량을 확인하였다. CCT는 그림 6과 같이 시뮬레이션 결과에서 발전기의 회전자 각도를 통해 확인하였으며 고장이 발생한 후 4개의 발전기의 회전자가 동기를 유지할 수 있는 고장 제거시간의 임계값을 확인하였다. 컨버터의 무효전력 공급 크기에 따른 CCT 결과는 표 3에 기록하였다. 시뮬레이션 결과 무효전력의 공급량이 증가함에 따라 CCT는 증가하는 경향을 보였으며 시뮬레이션 상에서는 컨버터가 없는 계통보다 약 9% 이상의 증가를 보인 것을 확인할 수 있었다.

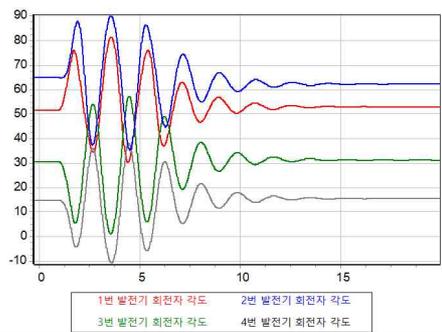


그림 6. 전력 계통 시뮬레이션 결과

표 3. 운전 상황별 임계고장 제거 시간

| 컨버터 공급 전력[MVar] | CCT[s] | CCT 증가율 [%] |
|-----------------|--------|-------------|
| No Converter | 0.614 | - |
| 370.81 | 0.616 | 0.326 |
| 384.58 | 0.645 | 5.05 |
| 389.74 | 0.655 | 6.68 |
| 393.83 | 0.662 | 7.82 |
| 396.86 | 0.666 | 8.47 |
| 398.87 | 0.669 | 8.96 |

본 논문에서는 컨버터와 계통 사이의 전력 조류와 컨버터의 DC 전압의 크기에 의한 출력 AC 전압의 제한에 따른 전력 출력 범위를 분석하고 적절한 변조를 통해 DC 전압의 이용률을 증가시켜 컨버터의 출력 범위를 확장할 수 있는 방법에 대해 분석하였다. 선형변조 영역에서는 SVPWM을 이용하여 DC 전압의 이용률을 증가시킬 수 있으며 과변조 영역에서는 구형파 제어를 통해 DC 전압을 최대도 이용하여 컨버터의 출력 범위를 확장할 수 있다. 400MVA급 컨버터 시뮬레이션의 결과를 통해 선형변조 영역에서 DC전압을 최대도 이용하여도 출력 범위에 제한이 있었지만 과변조를 통해 컨버터의 정격만큼의 무효전력을 출력할 수 있음을 확인할 수 있고, 이는 고장 상황 시 과변조 방법을 통해 계통에 컨버터의 출력 상한 만큼의 무효전력을 공급할 수 있음을 의미한다. 컨버터의 무효전력 공급 범위가 증가함에 따라 계통의 안정도 변화를 전력 계통 시뮬레이션을 통해 CCT를 평가하여 확인한 결과 컨버터의 무효전력 출력이 증가함에 따라 CCT가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통해 컨버터의 무효전력 출력 범위의 증가가 계통의 과도안정도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 계통의 고장 상황 시 컨버터 전압 합성의 적절한 변조 방식에서의 절환을 통하여 무효전력 공급량을 증가 시킴으로써 CCT를 추가로 확보할 수 있고, 이러한 운전 방법은 전력 계통을 더욱 안정적으로 운영하는데 유용하게 이용될 수 있다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2019R1G1A1094707)

참고 문헌

- [1] E. Vittal, M. O'Malley, and A. Keane, "Rotor angle stability with high penetrations of wind generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 1, pp. 353-362, 2012.
- [2] D. Van Hertem, O. Gomis-Bellmunt, and J. Liang, HVDC grids: offshore and supergrid of the future, ser. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2016.
- [3] 정대웅, 육섯 전압에 의한 3상 전압형 인버터 PWM 방법의 일반적 해석, 서울대학교 박사 학위논문, 2000