

다양한 계통 불평형 상황에서 계통연계형 3-level NPC 컨버터의 중성점 전류에 대한 해석

최재훈 서용석

전북대학교 공과대학 전기공학과

Analysis of Neutral Point Current in Grid Tied 3-level NPC Converter under Various Grid Imbalance Conditions

Jaehoon Choi, and Yongsug Suh

Department of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Koera

ABSTRACT

현재 신재생에너지 발전원은 계속 증가되고 있으며, 발전기의 용량 또한 점점 증가하고 있다. 늘어나는 신재생에너지 발전원에 의해 계통 연계의 중요성이 증대되고 있고 아울러 계통에서 발생할 수 있는 여러 가지 사고로 인한 발전기의 PCS의 고장에 대한 문제 또한 중요해지고 있다. 본 논문에서는 신재생발전원의 용량이 증가함에 따라서 각 스위치의 전기적 스트레스를 줄일 수 있는 3-level NPC 타입의 컨버터회로를 기반으로 이중 전류 제어기를 이용하였고, 계통 사고시에도 강인한 위상 추종 특성을 가지는 DDSRF(Decoupled Double Synchronous Reference Frame 이하 DDSRF)방식의 PLL을 채택하여 시뮬레이션을 진행하였다. 현재 계통의 사고에 의한 사고전압은 ABC 분류에 의해서 크게 A~G 타입으로 나타내고 있다. 본 논문에서는 각 타입별 사고전압의 불평형 지수(Imbalance Factor, 이하 IF)에 따른 중성점 전류의 고조파 성분을 분석하여 도식화 하고자 한다. 이는 계통사고 발생 시 계통연계형 컨버터의 제어 및 계통탈락 여부에 활용 할 수 있을 것으로 예상된다.

1. 서 론

풍력발전기와 태양광발전 등의 신재생 발전원의 용량은 지속적으로 증가되고 있다. 따라서 발전기의 PCS의 용량 또한 증가되고 있으며, 그로인해 PCS에 전력스위치가 받게 되는 스트레스를 줄이기 위한 NPC 회로가 자주 사용 되고 있다. 이와 같이 PCS의 성능은 증가되어 지고 있지만, 계통에서의 발생하는 사고는 매년 발생하고 있으며, 그로인해 계통과 연계된 PCS에 발생하는 문제는 과거부터 지금까지 계속 이슈가 되어 지고 있다. 특히 현재에는 신재생발전원의 증가로 인해 계통에 연결되는 PCS의 증가로 계통과 발전원의 관계는 더욱이 중요해지며, LVRT(Low Voltage Ride Through)와 같은 계통 사고 시 연결된 발전기에 요구되는 조건 또한 증가되어 지고 있다. 따라서 계통사고 발생 시 사고전압이 PCS에 미치는 영향에 대한 해석은 필요하며, 발전기의 용량이 지속적으로 증가되고 있는 현재에 있어서 매우 중요하다. 계통 사고 시 계통연계형 3-level NPC 컨버터의 중성점 전류의 제어 및 해석에 대한 연구는 진행 되었으나, 상전압의 크기만 줄어드는 사고전압에 관해서만 연구되었다.^[1]

따라서 본 논문에서는 계통에서 여러 사고유형에 따라 발생하는 다양한 사고전압이 계통연계형 3-level NPC 컨버터의 중성점 전류에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 해석을 하고자 한다.

2. 다양한 종류의 계통 불평형

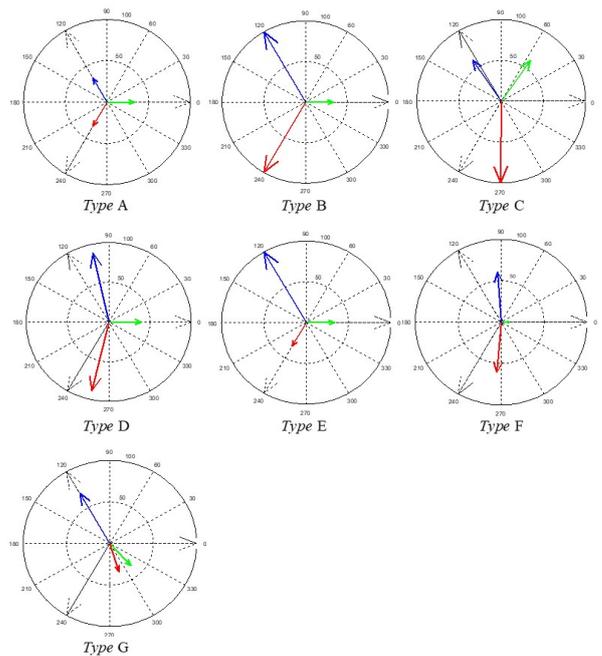


그림 1. ABC분류에 의한 타입 별 사고전압의 벡터다이어그램

그림 1은 계통에서 발생할 수 있는 여러 유형의 사고에 의해 발생되어지는 사고전압의 벡터다이어그램을 보여준다. Type A의 경우 3상의 상전압의 크기가 동일하게 줄어드는 사고전압이다. 이와 같은 경우 3상의 평형이 깨진게 아니므로, 해석에서 제외한다. Type A를 제외하면 계통 사고 시 3상 전압의 위상 또는 크기가 평형이 아니다. 그 중 Type B,E의 경우 불평형의 정도가 심해질수록 상전압의 크기만 줄어드는 형태로 나타난다. 나머지 Type C,D,F,G의 경우 상전압의 크기와 각상이 이루는 위상까지 틀어지는 형태로 나타난다.^[3,4] 이러한 사고에 의한 상전압의 크기와 위상의 변동은 계통연계형 3상

3-level NPC 컨버터의 DC-링크 커패시터간의 불균형을 야기시키고, 그로인해 중성점 전류의 고조파 성분 또한 증가시킨다. 본 논문에서는 불평형에 의해 발생하는 중성점 전류의 고조파 성분 중 불평형의 영향을 대표적으로 나타내는 1차 고조파 성분에 대해서 분석한다.

3. 사고전압과 Imbalance Factor의 관계

그림 1에서 보이듯이 여러 유형의 사고전압들은 다양한 형태로 3상의 평형이 깨져 불평형을 이룬다. 불평형의 정도가 심해짐에 따라서 사고전압의 역상분의 크기 또한 증가하게 된다. 본 논문에서는 불평형의 정도가 심해짐에 따라서 증가하는 사고전압의 역상분과 반대로 감소하는 정상분을 이용하여 불평형 지수인 IF를 수식 (1)~(3)와 같이 정의하였다. E_{dn} 과 E_{qn} 은 역상분의 d축 성분과 q축을 나타내고, E_{dp} 와 E_{qp} 은 정상분의 d축 성분과 q축 성분을 나타낸다. E_{health} 는 불평형이 발생하지 않았을 때 상전압의 크기를 나타낸다.

$$Case 1 : IF(\%) = \frac{\sqrt{E_{dn}^2 + E_{qn}^2}}{\sqrt{E_{dp}^2 + E_{qp}^2} + \sqrt{E_{dn}^2 + E_{qn}^2}} \times 100 \quad (1)$$

$$Case 2 : IF(\%) = \frac{\sqrt{E_{dn}^2 + E_{qn}^2}}{\sqrt{E_{dp}^2 + E_{qp}^2}} \times 100 \quad (2)$$

$$Case 3 : IF(\%) = \frac{\sqrt{E_{dn}^2 + E_{qn}^2}}{E_{health}} \times 100 \quad (3)$$

이후 여러 불평형 상황을 모사한 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터를 기반으로 3-level NPC 컨버터의 중성점 전류의 1차 고조파 성분을 3가지 Case의 IF로 나타내어 분석하였다.

4. 시뮬레이션

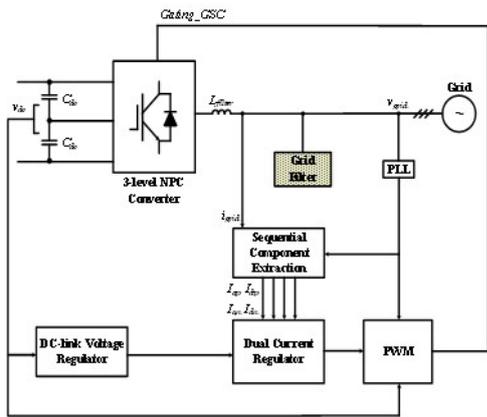


그림 2. 시뮬레이션 구성 블록다이어그램

시뮬레이션은 그림 2와 같이 구현하였다. 시뮬레이션의 동작 조건과 각 파라메타 값은 표 1와 같다.

표 1 시뮬레이션 회로 파라메타 값과 동작 조건

Parameters	Values
Rated power	5 MW
Rated line voltage	4160 V
Rated ac input current	693 A
Frequency	60 Hz
DC link voltage	7000 V
DC link capacitance	2 mF
Converter switching frequency	1020 Hz
Grid side line inductance	0.46 mH
Transformer leakage inductance	1.1 mH
Filter inductance	1.5 mH
Filter capacitance	0.34 mF
Filter resistance	0.92 Ω

4.1 DDSRF-PLL

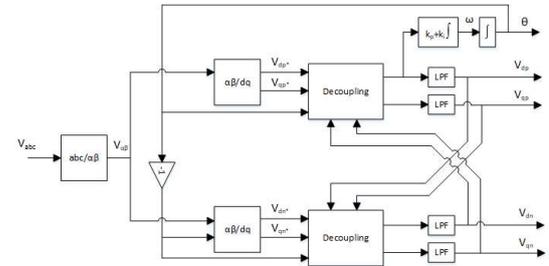


그림 3. DDSRF-PLL 회로 블록다이어그램

그림 3은 DDSRF-PLL의 시뮬레이션 구성도를 보여준다. 일반적으로 사용되는 Zero crossing-PLL이나 SRF-PLL은 입력 전압의 위상이 틀어지는 불평형이 생길 경우 그에 따른 위상 추종에 약하다는 단점이 있다. 따라서 계통 사고시에도 위상 추종에 강인한 특성을 가지는 DDSRF-PLL을 사용하였다. 그림에서 보이듯이, 불평형의 상전압을 정상분의 d-q값과 역상분의 d-q값으로 분리한다. 사고전압의 불평형의 정도가 커질수록 역상분의 크기는 증가하게 되지만 DDSRF-PLL은 Decoupling을 통해 역상분이 정상분에 영향을 끼치는 부분을 제거하고 정상분에 위상을 동기화하게 된다. 따라서 사고전압의 위상변동으로 인하여 생기는 제어기의 오류를 최소화 시킬 수 있다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 4는 중성점 전류의 1차 고조파와 3가지 Case의 IF에 대한 그래프이다. 모든 불평형 타입에서 IF에 따라서 중성점 전류의 1차 고조파 성분이 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Case 3의 경우 E_{health} 는 일정하지만 중성점 전류의 1차 고조파 크기는 불평형의 타입에 따라서 증가량이 다르다. 따라서 IF가 증가할수록 각 불평형 타입 간의 중성점 전류의 1차 고조파 성분의 크기차이는 더욱 커질 것이다. 그러므로 Case 3의 IF는 불평형 정도에 따른 중성점 전류의 1차 고조파를 나타내는 지표로는 부적합하다. Case 1과 2는 IF의 증가에 따른 중성점 전류의 1차 고조파 성분이 비슷한 경향으로 증가한다. 그러나 불평형이 심해 질수록 정상분의 크기는 줄어들고

역상분의 크기는 증가하기 때문에 극단적인 경우 Case 2의 IF 값은 매우 커지게 되어 중성점 전류의 1차 고조파와 IF의 그래프가 비선형적으로 그려지게 되어 불평형의 지표로 부적합하다. Case 1은 IF에 따른 중성점 전류의 1차 고조파 성분이 비례적으로 증가하고, 같은 IF 대비 불평형 타입 별 중성점 전류의 1차 고조파 성분의 크기차이가 비교적 심하지 않으므로, 불평형의 지표로 적합하다고 판단한다. 따라서 Case 1의 IF를 이용하여 불평형 타입 별 중성점 전류의 1차 고조파 성분을 해석하였다. 그림 4의 Case 1 그래프를 보면, 동일한 IF에서 같은 1차 고조파 성분을 갖는 타입은 B와D 그리고 E와G 였고, 시뮬레이션 데이터를 통해 각 사고전압에 역상분의 d-q축 성분의 크기가 같은 것을 확인하였다. 이를 토대로 사고전압의 역상분의 크기가 같더라도, 역상분의 d-q축 성분의 비율에 따라서 중성점 전류의 1차 고조파 성분에 미치는 영향이 다른 것으로 확인되었다. Type B,D와 F 그리고 Type C와 E,G는 같은 d-q축 성분을 가지지만, Type B,C,D의 경우 사고유형이 1상에서 사고가 발생하여 생기는 불평형 타입이고, Type E,F,G는 2상에서 사고가 발생하여 생기는 불평형 타입이기 때문에 역상분의 크기가 같더라도 정상분의 크기가 다르므로 같은 IF에서 중성점 전류의 1차 고조파 성분의 크기가 달랐다.

5. 결 론

본 논문은 계통 사고시 발생할 수 있는 다양한 유형에 불평형이 계통연계형 3-level NPC 컨버터의 중성점 전류에 어떠한 영향을 미치는지 해석하였다. 사고전압의 역상분과 정상분의 크기를 이용하여 IF값을 도출하였고, IF의 크기에 따라서 각 타입 별로 중성점 전류의 1차 고조파성분에 미치는 영향에 대해서 해석하였다. 하지만 사고전압의 유형에 따라서 같은 IF 여도 중성점 전류의 1차 고조파 성분의 크기는 다른 것을 확인하였고, 이는 불평형 타입에 따라서 같은 크기의 역상분 값이 어도 d축 성분과 q축 성분의 크기가 다르므로 각 중성점 전류의 고조파 성분에 영향을 미치는 정도가 다르기 때문이라고 판단된다. 향후 사고전압에 역상분의 d축 성분과 q축 성분을 각각 고려하여 제어 알고리즘을 구현하면 제어기의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 에너지 거점대학 클러스터 사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R18XA04)

참 고 문 헌

- [1] Kyungsub Jung, and Yongsug Suh, "Compensation of Neutral Point Deviation under Generalized 3-Phase Imbalance in 3-level NPC Converters", Journal of Power Electronics, Vol. 18, No. 6, pp. 1866 - 1878, November 2018.
- [2] Pedro Rodríguez, Josep Pou, Joan Bergas, J. Ignacio Candela, Rolando P. Burgos, and Dushan Boroyevich, "Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 2, March 2007
- [3] Roger C. Dugan, Mark F. Mcgranaghan, Surya Santoso, and H. Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality: Second Edition, Mcgraw-Hill Publishing Company, Inc pp. 53-55, 2004
- [4] Leborgne, R. "Voltage Sags Characterisation and Estimation", Master's thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/9004.pdf>

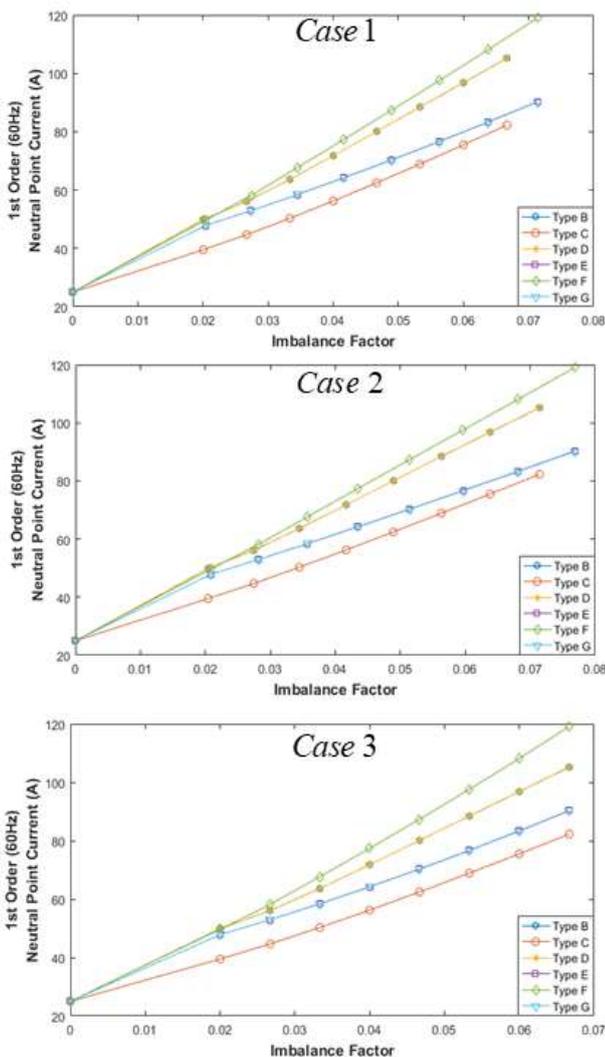


그림 4. 불평형 타입 별 IF(Case 1~3)에 따른 중성점 전류의 1차 고조파 성분