

멀티레벨 운전을 위한 4권선 변압기의 삼중 델타 전원 연결

온성재, 박용순, 설승기
서울대학교 전력전자연구센터

Triple Delta Sourced Winding Structure of 4-winding Transformer for Multi-level Operation

Sung-Jae Ohn, Yongsoon Park and Seung-Ki Sul
Seoul National University Power Electronics Center (SPEC)

ABSTRACT

본 논문에서는 4권선 변압기를 이용하여 멀티레벨 운전을 하는 새로운 결선 방식을 제안하였다. 일종의 개방형 권선 구조의 확장으로서, 동일한 하드웨어에서 결선만 바꿈으로써 2차단 권선에 인가되는 전압의 레벨 수를 늘릴 수 있다. 본 논문에서는 제안된 결선 방식에 대한 등가회로를 중첩원리를 이용하여 유도하였다. 제안된 결선 방식을 3개의 델타 결선된 권선에 적용하면, 2레벨 인버터를 사용하더라도 1개 권선의 전압을 합성하는 데 6개의 스위칭 상태가 관여하게 되어 권선 전압의 레벨 수를 9개까지 늘일 수 있다. 제안된 회로의 등가회로를 도출하고 모의실험을 통해 등가회로의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

계통의 주파수 조절을 위한 MW급 대용량 ESS와 이를 위한 토폴로지(topology)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 최대 십 수분 이내의 동작을 요구하는 주파수 조절의 특성 상 리튬 이온 배터리를 이용한 BESS(Battery Energy Storage System)에 대한 산업계의 관심이 높아지고 있다.

계통 연계를 위한 인버터 설계 시 에너지 저장 시스템용 전력 변환 장치의 출력 전류 고조파 규제를 만족시키기 위한 필터 설계가 필요하다. 이러한 필터에 사용되는 수동 소자는 시스템의 부피와 비용을 증가시키는데, 부피 절감을 위해 LCL 필터를 사용할 경우 공진(resonance)을 회피하기 위한 세심한 설계가 필요하다.

다권선(multi-winding) 변압기는 2차 측 권선 간에 전기적인 절연을 제공한다는 특징이 있다. 따라서 각 권선에 연결된 인버터 간 순환 전류가 존재하지 않고, 각 인버터 반송파의 위상을 천이(shifting)하는 인터리빙(interleaving) 운전이 가능하다. 인터리빙 운전은 위상이 서로 다른 전류 리플이 합쳐져 서로 상쇄되어 출력되기 때문에, 인버터 병렬 운전 시에 비해 더 작은 필터와 스위칭으로도 고조파 규정을 만족시킬 수 있다. 그러나 계통 측 전류 고조파가 인터리빙에 의해 저감되더라도, 각 인버터 측 전류 리플은 여전히 크므로 추가적인 반도체 손실과 동손을 야기할 수 있다. 본 논문에서는 4권선 변압기를 이용한 2차 측 권선들의 인버터에 대한 새로운 결선 방식을 제안한다. 개방형 권선과 [2]에서 제안된 Double Delta Sourced Transformer의 확장인 이러한 결선 방식은, 4권선 변압기와 2레벨 인버터 3대로 권선 전압의 레벨을 9개까지 증가시켜 인버터 전류 리플을 대폭 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안

된 회로의 등가회로를 도출하고, PLECS 시뮬레이션을 통해 도출된 등가회로의 유효성을 확인하였다.

2. 본론

2.1 제안된 결선 방식

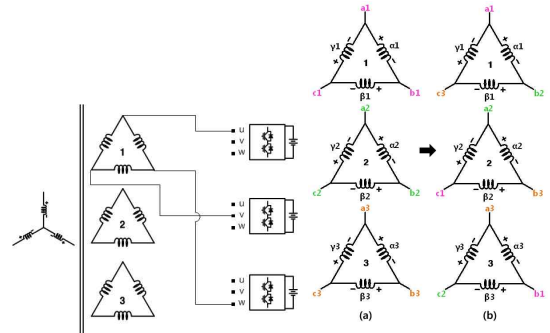


그림 1 제안된 결선 방식

그림 2 (a) 기존의 결선 방식, (b) 제안된 결선 방식

제안된 결선 방식은 그림1과 같다. a_1, b_1, c_1 은 각각 인버터 1의 a상 출력, b상 출력, c상 출력을 의미한다. $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 은 델타 연결된 1번 권선의 각 권선을 의미한다. 1대의 인버터가 1개의 3상 권선에 모두 연결되는 기존의 연결 방식인 그림2 (a)와 달리, 제안된 결선 방식은 그림 1과 같이 권선 1개의 전압합성에 모든 인버터에서 레그 1개씩 참여하게 된다.

2.2 제안된 결선 방식의 등가회로

2.2.1 중첩 원리를 이용한 인버터 1에서 본 등가회로

회로의 분석을 위해 중첩원리(Superposition Principle)와 KCL을 이용하여 인버터1에서 본 등가회로를 구해보면 다음과 같다.

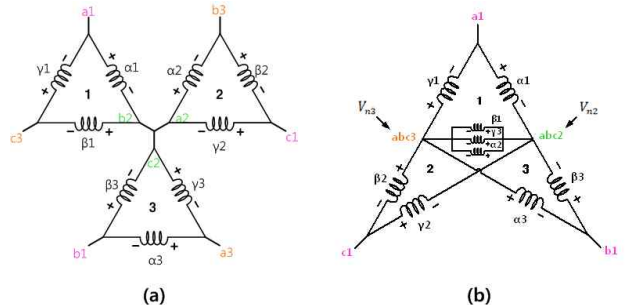


그림 3 (a) 인버터 2의 전압원 비활성 시의 등가 회로 (b) 인버터 2,3의 전압원 비활성 시의 등가회로

중첩원리에서 비활성된(deactivated) 전압원은 단락이 되므

로 인버터 2의 3상 전원을 단락시키면 제안된 회로는 그림 3 (a)와 같게 된다. 덧붙여, 인버터 3의 3상 전원까지 단락시킨 회로는 그림 3 (b)와 같다. V_{n2} , V_{n3} 는 각각 인버터 2, 3의 가상의 중성점을 의미한다. 회로 분석이 용이하도록 다시 그린 회로는 그림 4와 같다.

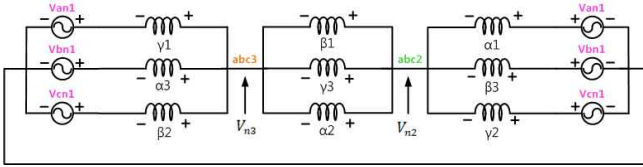


그림 4 인버터 2,3의 전원원 비활성 시의 등가회로 2

2.2.2 3상 평형 전압과 영상분 전압에 대한 등가회로

그림 4의 회로에 대해, 3개 권선 임피던스가 동일하다고 가정하고 이를 Z_w 라고 하자. 인버터가 합성하는 전압은 3상 평형 전압과 영상분 전압으로 나눌 수 있다.

$$V_{an1} = V_{as1} + V_{sn1} \quad (1)$$

권선 임피던스를 Z_w 라고 하면, 영상분 전압에 대해 회로는 다음과 같다.

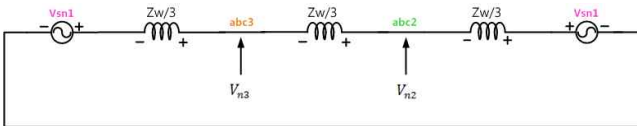


그림 5 인버터가 합성하는 영상분 전압에 대한 등가회로 위의 회로에서 $V_{n2} = V_{n3}$ 이므로 두 노드 간에는 전류가 흐르지 않는다. 3상 평형 전압에 대한 회로는 그림 6과 같다.

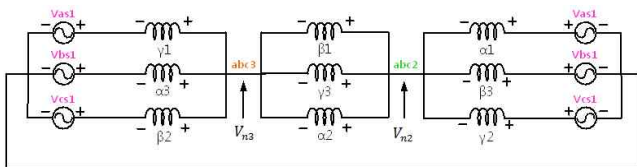


그림 6 인버터가 합성하는 3상 평형 전압에 대한 등가회로 $V_{n2} = V_{n3}$ 임을 증명하기 위해 KCL을 풀면 식(2)와 식(3)과 같다. 3상 평형 전압이므로 식(4)가 성립한다.

$$\frac{V_{n2} - V_{as1}}{Z_w} + \frac{V_{n2} - V_{bs1}}{Z_w} + \frac{V_{n2} - V_{cs1}}{Z_w} + \frac{V_{n2} - V_{ns3}}{Z_w/3} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{V_{n2} - V_{as1}}{Z_w} + \frac{V_{n2} - V_{bs1}}{Z_w} + \frac{V_{n2} - V_{cs1}}{Z_w} + \frac{V_{n2} - V_{ns3}}{Z_w/3} = 0 \quad (3)$$

$$V_{as1} + V_{bs1} + V_{cs1} = 0 \quad (4)$$

식(2)~(4)를 연립하면 $V_{n2} = V_{n3}$ 임이 증명되어, 전류가 흐르지 않는 회로를 생략하면 제안된 회로는 그림7(a)와 같은 간단한 Y형태의 등가회로로 표현된다. 나머지 2대의 인버터에 대해서도 같은 방법으로 등가회로를 구할 수 있고 이를 정리하면 그림 7과 같다.

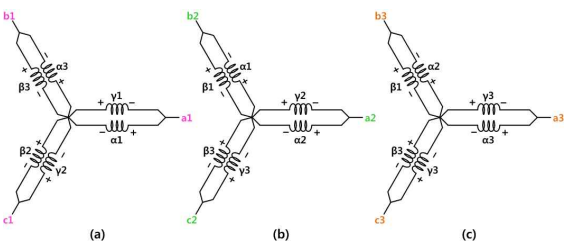


그림 7 (a),(b),(c) 각 인버터 1,2,3 에서 본 등가회로 a1권선에 인가되는 전압은 식(5)와 같다.

$$V_{a1} = \frac{V_{dc1}}{3}(2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1}) + \frac{V_{dc2}}{3}(S_{a2} - 2S_{b2} + S_{c2}) \quad (5)$$

2.2.3 PLECS 시뮬레이션 결과

PLECS 시뮬레이션을 통해 도출한 등가회로를 검증하였다. 배터리 전원은 900V, 스위칭 주파수는 1.5kHz이다. 3대 인버터의 출력 상전압 지령은 모두 동일한 위상과 크기를 가지도록 개루프(open loop) 제어하였다. 상전압 지령의 크기는 360V로 이는 변조지수(Modulation Index) 0.8에 해당한다. 각각의 인버터에 120°씩 위상차를 보이는 반송파를 이용해 SVPWM을 적용하였다. 그림 8은 a1권선에 인가되는 전압 지령과 실제 스위칭에 의해 인가되는 전압을 비교한 그림이다.

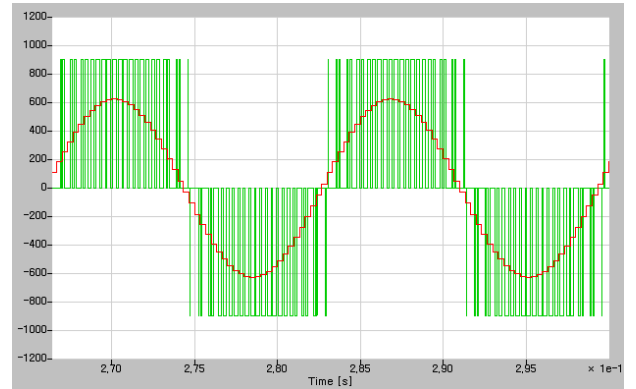


그림 8 기존 결선 방법 시에 $\alpha 1$ 권선에 인가되는 전압(초록)과 전압 지령 $V_{as1}^* - V_{bs2}^*$ (빨강)

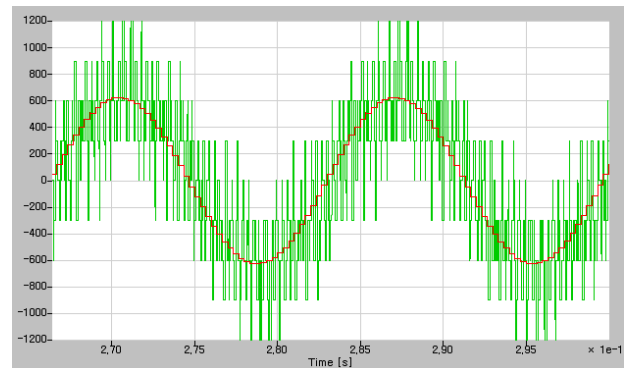


그림 9 제안된 결선 방법 시에 $\alpha 1$ 권선에 인가되는 전압(초록)과 전압지령 $V_{as1}^* - V_{bs2}^*$ (빨강)

전압의 왜형률(VTHD)은 기존 결선 방식의 경우 91.27%였지만, 제안된 결선 방식의 경우 71.44%로 20% 감소하였다.

3. 결론

본 논문에서는 4권선 변압기를 위한 새로운 결선 방식을 제안하였다. 개방형 권선 구조와 Double Delta Sourced Transformer의 확장인 이 방식은 총 6개의 스위칭 함수가 1개 권선전압 합성에 관여하며, 전압 레벨 수를 9개까지 늘릴 수 있다. PLECS 시뮬레이션을 통해 등가회로를 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 스마트그리드 표준화 포럼, '에너지 저장 시스템용 전력변환장치의 성능 요구사항, SGSF-04-2012-07'
- [2] Yongsoo Park, Sungjae Ohn, Seung-Ki Sul, 'Multi-Level Operation with Two-Level Converters Through Double-Delta Source Connected Transformer', *Journal of Power Electronics*. To be published.