

지그재그 변압기를 사용한 멀티레벨 컨버터 기반 E-STATCOM 시스템

김재명, 정재정
경북대학교

E-STATCOM System Based on A Multilevel Converter Using A Zigzag Transformer

Jae-Myeong Kim, Jae-Jung Jung
Kyungpook National University

ABSTRACT

전력 계통에서 인버터 기반 자원들의 많은 투입은 주파수 변동으로 인한 계통의 불안정성을 야기할 수 있다. 에너지 저장 장치(energy storage system; ESS)의 계통 투입은 이러한 불안정성을 해소할 수 있는 해결책 중 하나이다. 따라서 ESS의 안정적인 전력 전송을 위한 전력전자 설비에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 다양한 전력전자 설비 중 멀티레벨(multilevel) 컨버터 기반의 정지형 무효전력 보상 장치(static synchronous compensator(STATCOM)와 ESS를 통합한 E-STATCOM이 각광받고 있다. 본 논문에서는 지그재그 변압기를 사용한 멀티레벨 컨버터 기반의 E-STATCOM에 대해 제안한다. 또한, 제안한 시스템에 대한 멀티레벨 컨버터의 전체적인 제어 기법에 대해 설명하며 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

전 세계적으로 친환경 에너지 정책과 더불어 태양광, 풍력 및 수력 등의 재생 가능한 자원이 급격하게 발전하고 있다. 따라서 발전망에서 재생 가능한 자원의 전력 생산 비율이 증가하고 있다. 하지만 이러한 재생 가능한 자원들은 예측할 수 없는 변동성과 간헐적인 특성을 가진다. 이러한 특성은 계통에서 전력 요구에 대한 빠른 응답을 어렵게 만들며, 전압과 주파수의 변동을 일으켜 계통 불안정성을 야기한다. 이러한 문제는 계통에 안정적이고 연속적인 에너지 공급이 가능한 에너지 저장 장치(energy storage system; ESS)를 추가하여 해결할 수 있다.

리튬 이온 배터리와 슈퍼 커패시터의 발달 및 가격 하락으로 인해 ESS는 다양한 응용 분야에서 각광받고 있다. 계통에서 ESS는 안정적으로 고품질 전력 전송을 하기 위해서 전력전자 설비가 요구된다. 다양한 전력전자 설비 중에서 풀-브리지 기반의 멀티레벨 컨버터(full-bridge-based multilevel converter; FB-MC)에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. FB-MC는 전력반도체 스위치들과 dc 커패시터로 구성된 수많은 서브모듈(submodule)로 구성되어 있다. 이러한 구조적 특성으로 인해 고품질의 출력, 용이한 전압 확장과 빠른 응답성 등의 장점이 있다. 이러한 장점들로 인해 중전압 및 고전압 dc 송전시스템과 정지형 무효전력 보상 장치(static synchronous compensator; STATCOM)에서 널리 사용된다. FB-MC 기반의 STATCOM(FB-MC-STATCOM)은 PCC(point of common coupling)단 전압 조정과 무효전력 제어를 통해 계통의 안정성 향상에 기여하는 설비이다. 그러나 ESS가 없는

기존의 FB-MC-STATCOM의 내재된 에너지는 1차 주파수 제어를 위해 요구되는 추가적인 유효전력을 공급하는 것에는 불충분하다. 그러므로 FB-MC-STATCOM에 ESS를 통합하여(E-STATCOM) 1차 주파수 제어를 위한 추가적인 유효전력을 공급할 수 있다.

기존의 스타 결선 FB-MC 기반의 E-STATCOM의 회로 방식 중 하나로 배터리와 DC/DC 컨버터가 서브모듈 커패시터에 연결되어 있는 구조를 가정할 수 있다. 그리고, 3상 클러스터(cluster)는 인터페이스(interface) 인덕터와 와이-델타 변압기를 통해 PCC단과 병렬로 연결되어 있다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 지그재그 변압기를 사용하여 지그재그 변압기의 중성단과 멀티레벨 컨버터의 중성단 사이에 배터리와 DC/DC 컨버터를 연결하였다. 지그재그 변압기의 구조적 특성으로 인해 지그재그 변압기의 중성단은 매우 작은 임피던스를 가진 영상분 전류 경로를 제공할 수 있다^[1]. 이러한 특성은 배터리와 DC/DC 컨버터를 통한 추가적인 유효전력 공급이 가능하게 한다. 또한, 해당 구조에서는 풀-브리지 기반의 서브모듈(full-bridge-based submodule; FBSM) 뿐만 아니라 하프-브리지 기반의 서브모듈(half-bridge-based submodule; HBSM)도 사용할 수 있다. 그러므로 HBSM만을 사용하는 half-bridge-based multilevel converter; HB-MC) 뿐만 아니라 HBSM과 FBSM이 혼합된 mixed-multilevel converter(Mixed-MC)도 구성할 수 있다. HB-MC의 경우에는 FB-MC와 비교하여 동일한 정격 기준으로 서브모듈 커패시터가 2배가 된다. 반면에 출력전압의 레벨도 약 2배가 될 수 있다. 따라서 FB-MC와 비교하여 작은 스위칭 주파수에서 운전이 가능하며 출력전압의 총 고조파 왜율(total harmonic distortion; THD)이 감소하여 고품질의 전압을 출력할 수 있다. 이러한 상충관계와 그림 1의 ESS의 출력전압(v_{ESS}) 및 델타-지그재그 변압기의 변압비를 고려하여 적절한 Mixed-MC를 구성할 수 있다. 기존의 스타 결선 FB-MC의 클러스터 커패시터 에너지 균형은 영상분 전압을 통해 제어된다. 따라서 초기 기동 시 출력전류가 0인 조건 또는 무부하 조건에서 클러스터 커패시터 에너지 균형을 달성하기가 어렵다. 그러나, 제안한 시스템에서는 영상분 전류를 통해 해당 조건들에서 클러스터 커패시터 에너지 균형을 제어할 수 있다.

2. 제안한 E-STATCOM 시스템

그림 1은 제안한 E-STATCOM 시스템을 나타낸다. 3상 클러스터는 수많은 서브모듈이 직렬 연결되어 있으며, 인터페이스 인덕터(L_c)와 델타-지그재그 변압기로 PCC단과

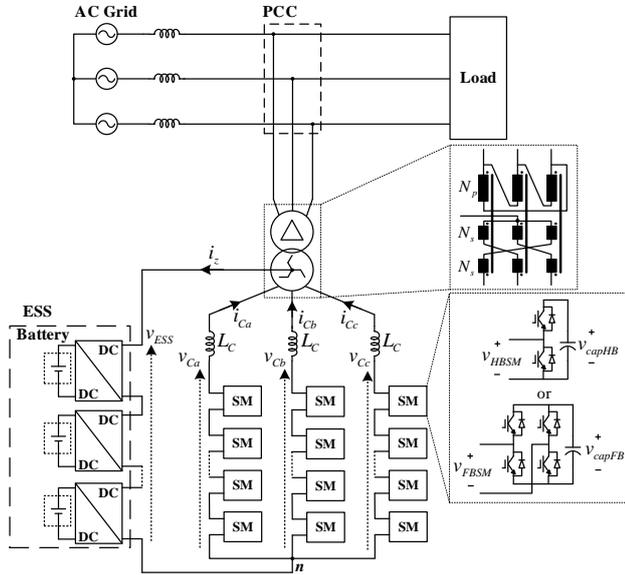


그림1 제안한 E-STATCOM 시스템

병렬 연결되어 있다. 변압기 2차측은 그림 1과 같이 연결되어 있으며, 각 코어에서 영상분 권선 전류에 의해 유도되는 자속을 상쇄시킬 수 있다. 따라서 dc 전류가 지그재그 변압기의 중성단으로 흐르더라도 지그재그 변압기는 포화 없이 정상적으로 동작할 수 있다. 또한, 지그재그 변압기의 영상분 임피던스는 누설 인덕턴스와 동일한 범위의 값으로 매우 작다. 따라서 지그재그 변압기의 중성단으로 흐르는 영상분 전류의 빠른 응답이 가능하다. 변압기의 1차측은 코어 비선형 현상으로 인한 3차 전류의 순환 경로를 제공하기 위해 델타로 연결된다^[11]. 이러한 지그재그 변압기의 이점으로 인해 ESS를 지그재그 변압기의 중성단과 멀티레벨 컨버터의 중성단 사이에 연결할 수 있다. 클러스터 전압은 식 1과 같이 나타낼 수 있다. v_{Cx} , $V_{cluster,dc}$, v_{xn} , $v_{cluster,0}$ 은 각각 클러스터 전압, 클러스터 전압의 dc 성분, ac 출력전류 제어를 위한 x 상 클러스터 전압의 ac 성분과 클러스터 커패시터 에너지 균형을 위한 영상분 전압을 나타낸다. x 는 a , b 와 c 상 중 하나를 의미한다. 식 1의 클러스터 전압의 dc 성분은 HB-MC와 Mixed MC 구성을 가능하게 한다.

$$v_{Cx} = V_{cluster,dc} + v_{xn} + v_{cluster,0} \quad (1)$$

3. 제안한 E-STATCOM 시스템을 위한 멀티레벨 컨버터의 전체 제어기

그림 2는 제안한 시스템에서 멀티레벨 컨버터의 전체 제어 블록 다이어그램이다. 본 논문에서는 동기 좌표계 정상분 d 축 전류와 정상분 q 축 전류를 무효전류(i_d^*)와 유효전류(i_q^*)로 칭한다. 전체 커패시터 에너지 제어기는 ESS와 멀티레벨 컨버터 사이의 dc 전류를 통해 멀티레벨 컨버터의 전체 커패시터 에너지를 제어한다. 또한, 서브모듈 커패시터 에너지는 기본과 주파수와 2고조파 주파수를 포함하고 있으므로 노치필터를 통해 제거하여 dc 성분만을 제어한다. PCC단 주파수 변동 혹은 ESS 충전과 방전에 대한 상위 제어기로부터 유효전류 지령을 받아 ac 전류 제어를 통해 유효전류를 제어한다. 유효전류에 따라 멀티레벨 컨버터의 전체 커패시터 에너지가 변화하게 되고 전체 커패시터 에너지 제어기에 의해서 자동적으로 ESS가 충전 또는 방전을

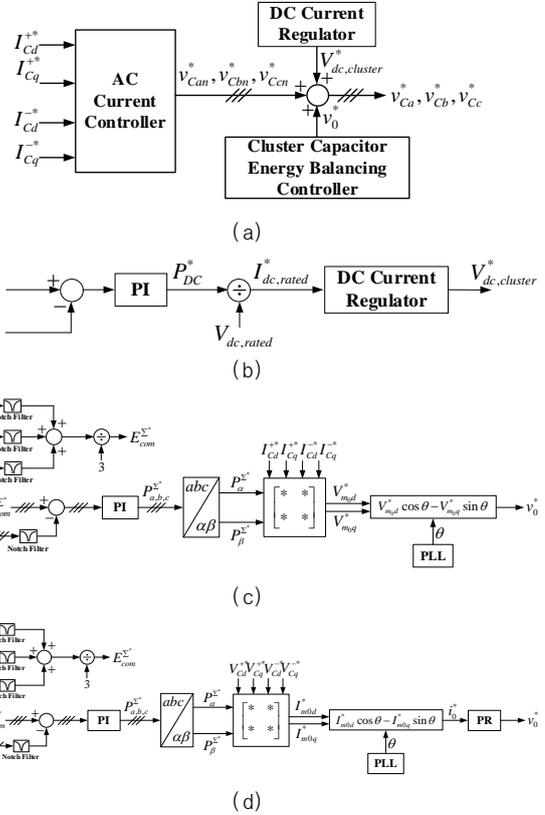


그림2 제안한 E-STATCOM 시스템의 멀티레벨 컨버터 제어 블록 다이어그램: (a)전체 제어기, (b)전체 커패시터 에너지 제어기, (c)영상분 전압을 사용한 클러스터 커패시터 에너지 균형 제어기, (d)영상분 전류를 사용한 클러스터 커패시터 에너지 균형 제어기

수행한다.

제안한 시스템에서 클러스터 커패시터 에너지를 달성할 수 있는 3가지 제어 요소가 존재한다. 첫 번째는 역상분 전류(i_d^* , i_q^*)이다. 그러나, 계통이나 부하 불평형 시에 E-STATCOM에서 역상분 전류를 보상하는 기능을 제공할 수 있다. 따라서 클러스터 커패시터 에너지 균형을 위해 역상분 전류를 사용하는 것은 바람직하지 않다. 두 번째는 영상분 전류이다. 기존 연구^[2]에 따르면, ac 성분이 포함된 dc 전류는 배터리 노화에 직접적으로 큰 영향을 미치지 않는다. 다만 특정 주기동안 소폭의 배터리 셀(cell) 내부 온도 상승의 관찰로 인해 간접적인 영향을 미칠 수도 있다고 판단하였다. 그러므로 배터리에 흐르는 전류의 ac 성분을 최소화하기 위해 영상분 전류를 통한 클러스터 커패시터 균형 제어는 초기 기동 시 출력전류가 0인 조건 또는 무부하 조건에서 배터리를 우회하여 사용하는 것이 바람직하다. 마지막으로 영상분 전압이다. 제안한 시스템에서 영상분 전압을 통한 클러스터 커패시터 에너지 균형은 영상분 전류를 발생하지 않기 위해 식 2와 같이 ESS에서 멀티레벨 컨버터와 동일한 영상분 전압을 출력함으로써 제어 가능하다. 따라서 배터리 전류 리플이 최소한으로 발생하며, 클러스터 커패시터 에너지 균형은 멀티레벨 컨버터의 영상분 전압과 3상 상전류에 의해 달성된다.

$$v_{ESS} = V_{ESS,dc} + v_{ESS,0} \quad (2)$$

4. 시뮬레이션 결과

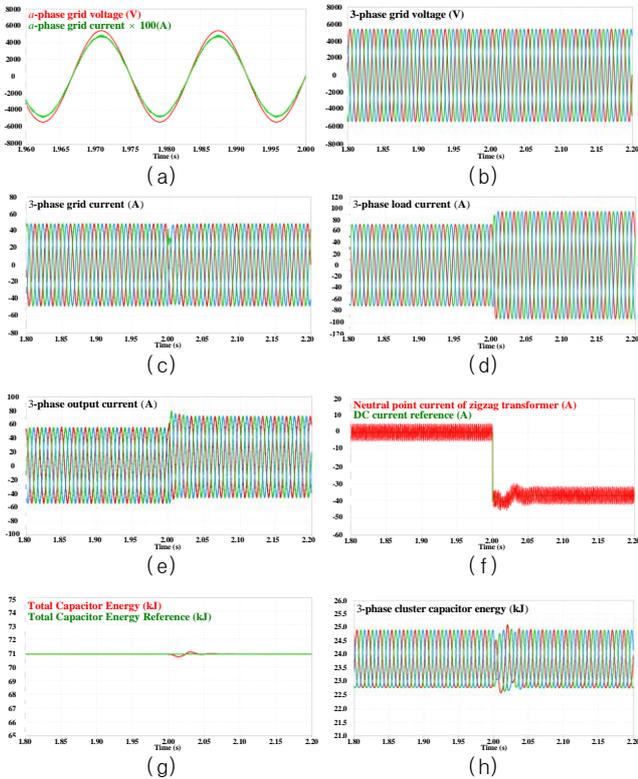


그림3 계통 및 부하 평형 조건에서 시뮬레이션 결과: (a) α 상 계통 전압과 전류, (b)3상 계통 전압 (c)3상 계통 전류, (d)3상 부하 전류, (e)3상 클러스터 출력 전류, (f)지그재그 변압기의 중성단 전류와 dc 전류 지령, (g)전체 커패시터 에너지와 전체 커패시터 에너지 지령, (h)3상 클러스터 커패시터 에너지

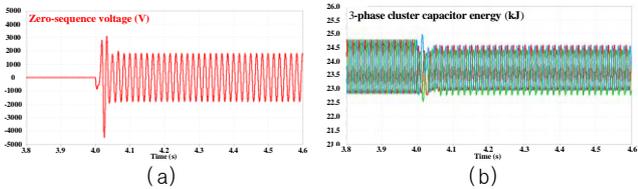


그림4 계통 및 부하 불평형 조건에서 시뮬레이션 결과: (a)영상분 전압, (b)3상 클러스터 커패시터 에너지

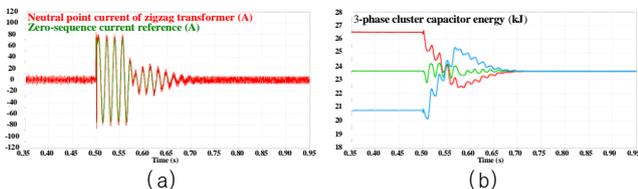


그림5 초기 구동 시 출력 전류 0인 조건에서 시뮬레이션 결과: (a)지그재그 변압기의 중성단 전류와 영상분 전류 지령, (b)3상 클러스터 커패시터 에너지

제한한 시스템과 제어 검증을 위해 1MVA E-STATCOM 시뮬레이션을 수행하였으며 계통의 정격 선간 전압은 6.6kV이다. 그림 1의 구성에서 멀티레벨 컨버터는 클러스터당 10개의 HBSM만을 사용하였으며, 서브모듈 커패시터의 정격 전압과 커패시턴스는 각각 1.5kV와 2100 μ F이다. 인터페이스 인덕터의 인덕턴스는 20mH이며 델타-지그재그 변압기의 변압비는 1:1이다. ESS는 정격 전압 1kV의 배터리 10개를 사용하였다. 첫번째 시뮬레이션 시나리오는 E-STATCOM은 기준에 부하에서 요구하는 무효전력만을 보상한다. 2s에 부하 임피던스를 감소시켜 발생하는 추가적인 유효전력을 E-STATCOM에서 보상한다. 그림 3(a)와 같이 계통 a 상 전압과

전류가 동위상으로 E-STATCOM에서 무효전력을 보상하여 계통에서는 유효전력을 전송하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b), 3(c), 3(d)와 3(e)에서 2s에 부하 임피던스가 감소되었을 때 추가적으로 요구되는 유효전력을 E-STATCOM에서 보상하여 계통은 안정적으로 기준과 동일한 전류를 출력한다. E-STATCOM이 보상한 유효전력은 ESS에서 지그재그 변압기의 중성단을 통해 전송되는 것을 그림 3(f)에서 확인할 수 있다. 그림 3(g)와 3(h)에서 멀티레벨 컨버터의 전체 커패시터 에너지 제어기와 클러스터 커패시터 에너지 균형 제어가 정상 동작하는 것을 확인할 수 있다. 두번째 시뮬레이션 시나리오는 c 상 부하 인덕턴스가 0.5pu 감소한 조건에서 4s에 일선 지락 사고를 모의하였다. 그림 4(a)에서 계통 불균형 시 추가적인 영상분 전압이 주입되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 클러스터 커패시터 에너지가 계통 및 부하 불평형 시에도 균형이 유지되는 것을 그림 4(b)에서 확인할 수 있다. 마지막으로 초기 구동 시 출력전류가 0인 조건에서 클러스터 커패시터 에너지 균형 제어기의 정상 동작을 확인하기 위해서 각 서브모듈의 커패시턴스를 다르게 모의하였다. 멀티레벨 컨버터의 출력전류가 0이므로 영상분 전압을 사용하여 클러스터 커패시터 에너지 균형을 달성하기는 어렵다. 따라서 영상분 전류를 사용하여 클러스터 커패시터 에너지 균형 제어를 수행하였다. 그림 5(a)와 5(b)에서 확인할 수 있듯이 영상분 전류가 주입되면서 3상 클러스터의 커패시터 에너지 균형을 달성한다.

5. 결론

본 논문은 재생 가능한 자원의 계통으로 투입이 증가함에 따라 계통 안정성을 향상하기 위한 E-STATCOM 시스템을 구성하기 위해서 지그재그 변압기를 사용한 스타 결선 멀티레벨 컨버터를 새로이 제안하였다. 지그재그 변압기는 시스템의 효율적인 에너지 균형 달성과 안정성을 향상하기 위한 핵심 요소이다. 제안된 시스템은 다양한 계통 및 부하 조건에서 안정적인 성능을 보여주며, 특히 영상분 전류를 사용하는 무부하 조건에서도 에너지 균형을 유지하는 것에 뛰어난 성능을 보인다. 본 논문은 지그재그 변압기를 사용한 스타 결선 멀티레벨 컨버터가 계통 안정성과 효율성을 향상할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

본 연구는 한국전력공사의 2022년 착수 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R22X002-27)

참고 문헌

- [1] S. Cui, J. -H. Lee, J. Hu., R. W. De Doncker, S. -K. Sul, "A modular multilevel converter with a zigzag transformer for bipolar MVDC distribution systems," in *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 34, pp. 1038-1043, 2019.
- [2] B. Kwak, M. Kim and J. Kim, "Comparative Analysis on the Electrical State-of-Health Degradation of 21700 LiNiCoAlO₂ based on Alternating and Direct Currents," *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 2021*, pp. 1380-1386.