

# 정상상태 및 사고상태별 CMV를 고려한 ESS 안전성 평가에 관한 연구

이예빈\*, 김홍기\*\*, 이일무\*\*, 노일래\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교, \*\*한국전기기술인협회

e-mail:yeab10@koreatech.ac.kr

## A Study on ESS Safety Evaluation Considering CMV by Normal and Abnormal States

Ye-Bin Lee\*, Hong-Gi Kim\*\*, Il-Moo Lee\*\*, Il-Rae Noh\*\* and Dea-Seok Rho\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

\*\*Korea Electric Engineers Association

### 요약

최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 빈번하게 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중에서 공통모드전압(CMV, common mode voltage)은 ESS 배터리 안전성에 악영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 PCS의 정상상태시 개폐기에 의한 CMV와 사고시 차단기에 의한 CMV의 발생 메커니즘을 제시하고, 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)를 고려하는 위험우선순위(RPN, risk priority number) 평가방안을 모델링하여, CMV의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, PCS부, 배터리부, 사고 발생 장치부 등으로 구성된 CMV 안전성 평가 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 3상 단락 및 지락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV는 “medium risk” 영역, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 “high risk” 영역으로 평가되어, ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생 에너지원의 출력 안정화, 수효관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능이 있는 에너지저장장치(ESS, energy storage system)의 설치가 급격하게 증가하고 있다[1]. 그러나 2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 화재를 시작으로 현재까지 지속적으로 ESS 화재사고가 발생하고 있어, ESS 산업 시장에 큰 피해를 주고 있다[2]. 이에 따라, 정부는 ESS의 안전성 확보를 위하여, 화재사고의 전기적 위해요인을 제시하고 있으며, 그 중에서 공통모드전압(CMV, common mode voltage)은 ESS 화재사고의 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다. 여기서, CMV는 ESS 운용환경에 따라 큰 값으로 나타나, ESS의 안전성에 악영향을 미칠 가능성이 있다.

따라서, 본 논문에서는 CMV에 의한 ESS의 안전성을 평가하기 위하여, 정상 및 사고상태시 개폐기 및 차단기에 의한 CMV를 제시한다. 또한, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험순위결정(RPN, risk priority number) 방법을 통해 CMV의 안전성 평가를 수행한다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성,

검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다. 즉, CMV의 심각도는 CMV의 크기에 따라 4가지 단계로, 검출도와 발생도는 각각 3가지 단계로 구분되며, 위험도가 클수록 위험등급을 상향시켜 평가한다.

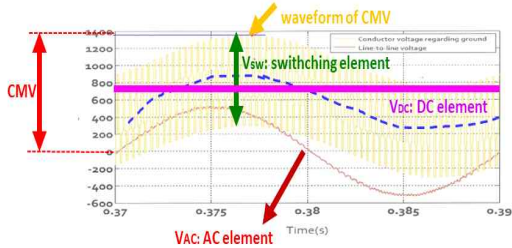
또한, 실제 ESS가 운용되고 있는 사이트에 대하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 AC 전원부, PCS부, 배터리부, ESS 사고 발생 장치부 등으로 구성된 CMV 안전성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 ESS의 안전성을 평가한 결과, 사고상태시 차단기에 의한 CMV는 “medium risk” 영역, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 “high risk” 영역으로 평가되어, ESS의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

### 2. ESS의 정상 및 사고상태 CMV 발생 메커니즘

#### 2.1 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 발생 특성

CMV는 그림 1과 같이 배터리 DC 전압( $V_{dc}$ ), AC 전압( $V_{ac}$ ), 스위칭 전압( $V_{sw}$ )으로 구성되며, CMV의 크기는 식 (1)과 같이 산정된다. 여기서, DC 전압은 배터리의 전압, AC 전압은 영상분 회로를 통해 DC측으로 유입된 전압, 스위칭

전압은 IGBT의 스위칭 동작에 의해 발생하는 전압을 의미한다.

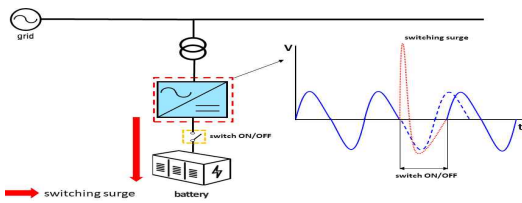


[그림 1] CMV 구성

$$V_{CM} = \sqrt{V_{dc}^2 + V_{ac}^2 + V_{sw}^2} \quad (1)$$

여기서,  $V_{CM}$ : waveform of CMV[V],  $V_{dc}$ : DC component [V],  $V_{ac}$ : AC component[V],  $V_{sw}$ : switching component[V]

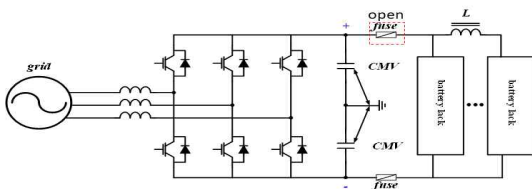
ESS의 PCS는 운용목적에 따라 하루 수차례 충·방전 동작을 수행하는데, 운용 중에 유지보수가 필요하거나 전력공급을 중단해야 하는 경우, 그림 2와 같이 개폐기에 의한 서지가 발생할 수 있다. 따라서, 정격전압의 수배 이상인 개폐서지는 기생 커패시턴스에 의한 CMV로 발생되어, 배터리에 악영향을 미칠 가능성이 있다.



[그림 2] 정상상태시 개폐기에 의한 CMV

### 2.2 사고상태시 개폐서지에 의한 CMV 발생 특성

ESS에 설치된 차단기는 운용 중 발생한 단락 및 지락사고로부터 설비를 보호한다. 그러나 차단기 동작시 발생한 시간에 따른 전류의 변화량( $di/dt$ )은 배터리와 DC 전로의 기생 인덕턴스와 결합되어 과도서지를 발생시키게 된다. 즉, 이러한 개폐서지는 그림 3과 같이 배터리의 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분배되어, (+)극과 접지 및 (-)극과 접지간 CMV를 발생시킬 수 있다.



[그림 3] 사고시 차단기에 의한 CMV

### 3. CMV를 고려한 ESS의 안전성 평가방안

#### 3.1 위험우선순위(RPN) 평가방식

시스템의 안전성을 평가하기 위해서는 설비를 구성하고 있는 다양한 요소들에 대한 위험성을 분석해야 하는데, 일반적으로 RPN 방식이 가장 많이 사용되고 있으며, 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)를 고려하여 산정된다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다. 한편, 각 요소에 대한 위험등급은 그림 4와 같은데, 낮은 등급일수록 위험에서 안전하고, 높은 등급일수록 위험에 노출될 확률이 증가하는 것을 의미한다.

RPN(S*O*D)	RPN rating									
severity(S)	1 (nearly impossible)	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (failure almost inevitable)
occurrence(O)	1 (no effect)	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (hazardous effect)
detection(D)	1 (almost certain)	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (absolute uncertainty)

[그림 4] RPN 차트

#### 3.2 제안된 위험우선순위 평가방식

기존의 RPN은 위험등급에 대한 분류가 많아서 CMV 안전성을 평가하는데 복잡하므로, 본 연구에서는 그림 5와 같이 위험등급을 분류하며, CMV 위험등급은 low, medium, high, very high로 구분된다.

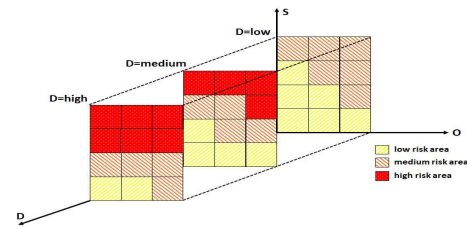
RPN(S*O*D)	RPN rating			
severity(S)	low	medium	high	very high
occurrence(O)	low	medium	high	
detection(D)	low	medium	high	

[그림 5] 제안된 RPN 차트

상기에서 제안된 RPN 모델링에서 CMV의 심각성(S)은 CMV 크기에 따라 4가지 단계로 산정되며, CMV 크기가 증가할수록 높은 위험등급을 적용한다. 즉, CMV의 크기가 배터리의 정격전압 이하인 경우에 위험등급을 “low”로 평가하고, CMV의 크기가 정격전압 이상이고 절연내력 이하인 경우에는 “medium”, 절연내력을 초과하는 경우에는 “high”, 절연내력을 수배 초과하는 경우에는 “very high”로 평가한다. 또한, CMV의 발생도(O) 위험등급은 3가지 단계를 적용한다. 여기서, 정상상태 개폐는 ESS 충·방전에 의하여 자주 발생하여 위험등급을 “high”로 평가하며, 차단기 개폐는 “medium”로 평가한다. 마지막으로 검출도(D)는 CMV의 잠재적 발견

가능성을 나타내는데, ESS에 의무적으로 설치되어 있는 서지보호장치(SPD, surge protection device)에 의하여 검출된다. 여기서, SPD는 ESS 설치 장소마다 서로 다른 정격전압(Un) 및 정정치(U<sub>p</sub>, U<sub>c</sub>)로 운용되어, CMV의 크기에 따라 SPD가 CMV를 검출하지 못할 가능성이 있다. 즉, 검출도의 위험등급은 CMV 크기에 반비례하여 평가될 수 있으므로, 심각도의 기준에 따라 산정된다.

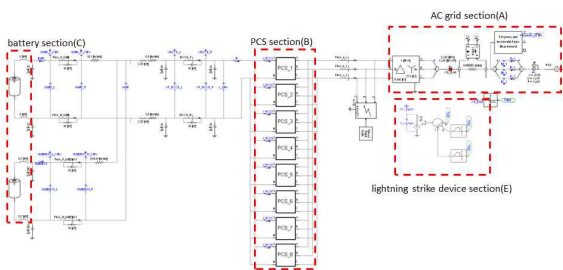
따라서, RPN에 의한 위험도 평가는 그림 6과 같이 “low risk”, “medium risk”, “high risk” 영역으로 나타낼 수 있다. 여기서, “low risk” 영역은 무시할 수 있는 위험을 나타내고, “medium risk” 영역은 상당한 위험, “high risk” 영역은 허용 불가 위험으로 분류된다.



[그림 6] RPN 방식을 이용한 위험순위 평가 모델링

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 CMV 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 모델링 하면 그림 7과 같다. 여기서, A부분은 주변압기, 고압선로, 연계용 변압기로 구성된 AC 전원부를 나타내고, B부분은 IGBT, DC link capacitor 등으로 구성된 PCS부, C부분은 배터리 랙과 DC 전로로 구성된 배터리부를 의미한다. 또한, D부분은 DC측 사고를 모의하는 사고 발생 장치부를 나타낸다.



[그림 7] 전체시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

ESS의 CMV 안전성을 평가하기 위하여, 배터리의 기생 커패시턴스, 배터리 전압, PCS 스위칭 주파수 등의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 연계용 변압기는 4가지 결선방식 중 Yg-Δ, Δ-Yg 방식을 비교하고 변압비는 22.9kV/440V로

상정된다.

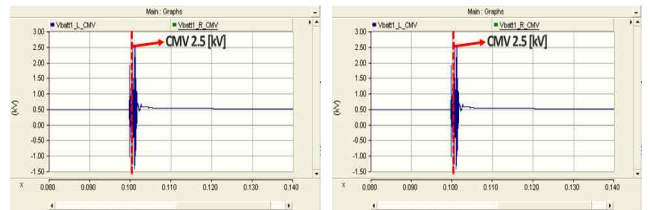
[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	항목
ESS 용량	1[MWh]
배터리부 기생커패시턴스	20[nF]
배터리의 정격전압	1[kV]
연계용 변압기의 변압비	22.9[kV]/440[V]
스위칭 주파수	4[kHz]

5.2 발생원인별 CMV 특성 분석

5.2.1 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 특성

정상상태시 개폐기에 의한 CMV 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ-Yg인 경우, 개폐에 의한 CMV는 순간적으로 최대 2.5[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, 그림 8(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Yg-Δ인 경우에도 최대 2.5[kV]까지 증가함을 알 수 있다.

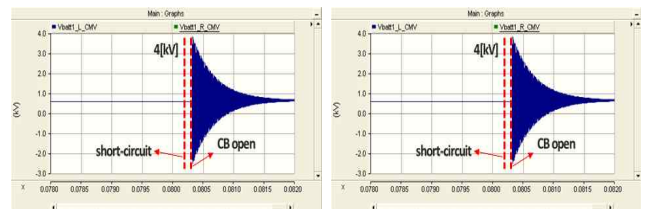


(a) Δ-Yg 결선 (b) Yg-Δ 결선

[그림 8] 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 특성

5.2.2 사고상태시 차단기에 의한 CMV 특성

ESS의 AC측 3상 단락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV 특성은 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9(a)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Δ-Yg인 경우, CMV는 순간적으로 최대 4[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b)와 같이 연계용 변압기의 결선방식이 Yg-Δ인 경우에도 CMV는 최대 4[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 즉, AC측에서 3상 단락사고시, 차단기 개폐 CMV가 배터리 절연내력(정격전압의 3배)을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

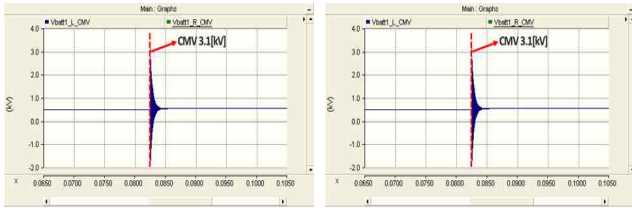


(a) Δ-Yg 결선 (b) Yg-Δ 결선

[그림 9] 3상 단락사고시 차단기에 의한 CMV 특성

한편, AC측 지락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV 특성은 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)는 연계용 변압기의 결선

방식이  $\Delta$ -Yg인 경우이며, CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, 그림 10(b)와 같이 연계용 변압기 결선방식이 Yg- $\Delta$ 인 경우에도 CMV는 순간적으로 최대 3.1[kV]로 산정됨을 알 수 있다. 즉, AC 측에서 단상 지락사고시, 차단기 개폐에 의한 CMV가 ESS에 설치된 배터리의 절연내력(정격전압의 3배)을 초과하여 배터리에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 따라서, AC측 단상 지락사고시 연계용 변압기의 결선방식에 따른 차단기 개폐에 의한 CMV는 연계용 변압기의 결선방식과 관계없이 동일함을 알 수 있다.



(a)  $\Delta$ -Yg 결선 (b) Yg- $\Delta$  결선  
[그림 10] 지락사고시 차단기에 의한 CMV 특성

### 5.3 CMV 특성을 고려한 ESS의 안전성 평가

상기의 3.2절에서 제안한 위험우선순위 평가방식을 바탕으로, CMV에 의한 ESS의 안전성을 평가하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 연계용 변압기의 결선방식은 ESS의 계통 연계기준에 따라 Yg- $\Delta$ 결선방식을 대상으로 하고 나머지 결선방식은 고려하지 않는다. 먼저, 심각도는 CMV의 크기를 고려하여 산정된다. 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 2.5[kV]로 산정되어 “medium”(CMV의 크기가 배터리의 정격전압 초과 절연내력 이하), 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV는 각각 4[kV], 3.1[kV]로 산정되어, “high”(CMV의 크기가 배터리의 절연내력 초과)로 평가될 수 있다.

한편, 발생도는 ESS의 운용현황, 전력계통의 사고율 등을 바탕으로 평가하고, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV 발생도는 ESS의 빈번한 충·방전에 의하여 CMV의 발생 빈도가 높으므로 “high”, 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV는 ESS 시스템의 사고율이 뇌격 발생률보다 높으므로 “medium”으로 평가된다. 또한, CMV의 검출도는 서지 보호장치인 SPD에 의하여 측정되는데, CMV 크기에 따라 검출지 못할 가능성이 있다. 정상상태시 개폐기에 의한 CMV는 2.5[kV]로 산정되어, SPD가 CMV를 검출하지 못할 가능성은 낮지만, CMV의 크기가 배터리 절연내력 이하이므로 “medium”으로 평가된다. 한편, 사고상태시 차단기 개폐에 의한 CMV는 3상 단락, 단상 지락시 각각 4[kV], 3.1[kV]로 산정되어, CMV의 크기가 SPD의 정정치 이상으로 검출할 가능성이 매우 높으므로, “low”로 평가된다.

따라서, 정상상태시 개폐기에 의한 CMV의 경우, S, O, D

가 각각 “medium”, “high”, “medium”으로 산정되어, 안전성은 “high risk” 영역으로 평가된다. 한편, 3상 단락과 지락 사고시 차단기 개폐에 의한 CMV의 경우, 두 사고 모두 S, O, D가 “high”, “medium”, “low”로 산정되어, 안전성은 “medium risk”로 평가된다. 따라서, 정상상태시 개폐에 의한 CMV가 “high risk” 영역으로 평가되어, ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 2] 정상 및 사고상태별 CMV를 고려한 ESS의 안전성 평가

CMV 종류	심각도	발생도	검출도	위험순위
정상상태시 개폐기에 의한 CMV	medium	high	medium	high risk
사고시 차단기에 의한 CMV (3상 단락)	high	medium	low	medium risk
사고시 차단기에 의한 CMV (지락)	high	medium	low	medium risk

## 6. 결 론

본 논문에서는 ESS 화재 원인 중 하나로 평가되고 있는 정상상태시 개폐기 및 사고상태시 차단기에 의한 CMV 발생 메커니즘 분석 및 RPN 방식을 이용하여, CMV를 고려한 ESS 안전성 평가방안을 제시한다. 정상상태시 개폐기에 의한 CMV의 경우, S, O, D가 각각 “medium”, “high”, “medium”으로 산정되어, 안전성은 “high risk” 영역으로 평가된다. 한편, 3상 단락과 지락사고시 차단기 개폐에 의한 CMV의 경우, 두 사고 모두 S, O, D가 “high”, “medium”, “low”로 산정되어, 안전성은 “medium risk”로 평가된다. 따라서, 5가지의 CMV 발생원인 가운데 정상상태시 개폐에 의한 CMV가 “high risk” 영역으로 평가되어, ESS의 안전성에 가장 큰 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090 & No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 최성문, 김승호, 김미영, 노대석, “ESS용 변압기의 접지방식에 의한 CMV 모델링 및 특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, 제 22권 4호, pp. 587-593, 2021
- [2] 박광목, 김재현, 박진영, 방선배, “화재현황 및 현장조사를 통한 ESS의 화재 위험성 연구”, 한국화재소방학회논문지, 제 32권 6호, pp. 91-99, 2018