

# 피크관리용 ESS가 설치된 수용가의 보호협조기기 운용알고리즘에 관한 연구

최성문\*, 신건\*, 정민철\*, 최익준\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:moon9507@koreatech.ac.kr

## Operation Algorithm for Protection Cooperation Device in Customer with ESS for Peak Management

Sung-Moon Choi\*, Jian Shen\*, Min-Chul Jung\*, Ik-Joon Choi\* and Dae-Seok Rho\*

\*Korean University of Technology and Education

### 요 약

수요관리용 ESS가 설치된 특 고압 수용가는 전력회사 측 리클로저와 보호협조를 통해 사고구간을 분리하기 위하여, ASS(auto section switch)를 수용가 수전 인입점에 의무적으로 설치하여 운영하고 있다. 그러나 절연파괴로 인해 ESS의 직류 측에서 단락사고가 발생하는 경우, 수배전용 변압기의 임피던스에 의해 사고전류가 감소하여, 전력용 퓨즈 보다 ASS가 먼저 동작해 수용가 전체의 정전을 유발시킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 낮은 사고전류에도 퓨즈가 동작하여 사고구간을 분리할 수 있도록 도식적 수법에 의한 보호협조 운용알고리즘을 제시한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 정전이 발생한 사이트의 수배전설비 부, PCS 부, 배터리 부, 전력용 퓨즈 부, 직류 전로 사고발생 장치부의 모델링을 수행한다. 한편, 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하는 경우 제안한 도식적 수법에 의해 적정한 퓨즈를 선정하면, ASS 보다 전력용 퓨즈가 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리하고 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

## 1. 서 론

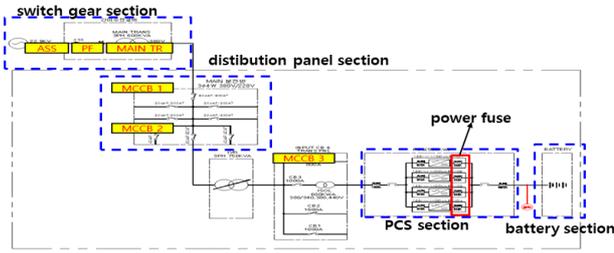
최근, 환경오염과 기후변화 문제를 해결하기 위하여, 신재생에너지의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 ESS가 설치되고 있다[1]. 특히, 피크저감용 ESS를 운영하고 있는 300 KVA 이상 1,000 KVA이하 특 고압 고객수전설비에는 수용가의 인입점에 ASS(auto section switch) 보호장치를 의무적으로 설치하고 있다. 하지만, ESS의 절연파괴로 인해 배터리 측의 DC 전로에서 단락사고가 발생하는 경우, 이 사고전류는 계통 임피던스에 의해 감소되어, 전력용 퓨즈가 동작하지 못하고 ASS가 먼저 동작하여 ESS가 설치된 수용가 전체에 정전이 발생할 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 도식적 수법을 이용하여, ASS의 동작시간과 전력용 퓨즈의 차단시간을 고려하여 선정하고, 이를 바탕으로 ESS의 보호협조 운용알고리즘을 제안한다. 또한, ESS의 보호협조 특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 수요관리용 ESS의 사고해석 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안한 도식적 수법 및 보호협조 운용알고리즘에 의해 선정된 퓨즈를 설치하면 ASS 보

다 전력용 퓨즈가 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리하고 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

## 2. ESS의 직류전로 단락사고에 의한 정전사례 분석

### 2.1 수요관리용 ESS 수용가의 구성

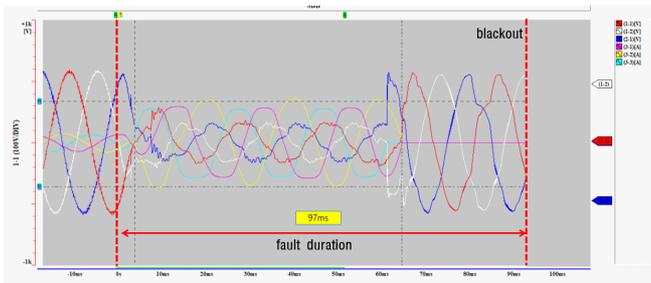
ESS의 직류 측 단락사고로 인하여 정전이 발생한 ESS 수용가계통은 그림 1과 같이, 수배전설비 부, 메인 분전반 부, PCS부 및 배터리 부로 구성된다. 여기서, 수배전설비 부는 ASS, 전력용 퓨즈, 메인 변압기로 구성되고, 메인 분전반 부는 사고전류 발생 시 MCCB(molded case circuit breaker)를 통해 선로를 차단하는 역할을 수행한다. 또한, LCL 필터, IGBT 모듈, DC-link 커패시터 등으로 구성된 PCS 부는 배터리의 충, 방전 기능을 수행하고, 여러 개의 랙으로 구성된 배터리 부는 저장된 전기에너지를 이용하여 수용가의 전력피크를 저감하는 역할을 수행한다.



[그림 1] 실제 ESS가 설치된 사이트의 구성

### 2.2 ESS의 직류 측 단락사고에 의한 정전사례

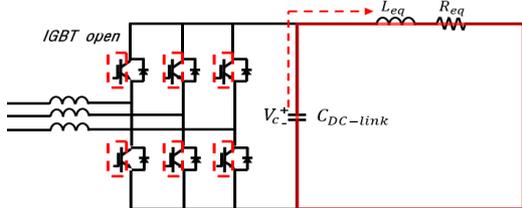
일반적으로, ESS의 직류 측 전력용 퓨즈는 DC 전로의 보호를 위하여 설치되고, 절연과파나 작업자의 부주의로 인해 ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하면 사고구간을 신속하게 차단하는 역할을 수행한다. 하지만, 수용가 설비의 임피던스가 큰 경우 감소된 사고전류에 의해서 전력용 퓨즈의 T-C 동작특성에 영향을 미쳐 전력용 퓨즈 보다 ASS가 먼저 동작하여 정전이 발생한 사례가 보고되고 있다. 또한, 그림 2는 상기의 감소된 사고전류에 의하여 정전이 발생한 수용가의 전압 및 전류를 측정하여, 이 그림에서와 같이 ASS는 설정치 이상의 전류가 흐르면 97 [ms]에 동작하여 수용가 전체의 정전이 발생함을 알 수 있다.



[그림 2] ESS의 직류 측 단락사고 인한 정전

### 2.3 ESS의 직류 측 단락전류 특성

ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하면 그림 3과 같이 PCS의 IGBT는 자기보호 동작을 통해 빠르게 개방되고, DC-link 커패시터에 충전된 에너지가 방전을 시작한다. 또한, DC-link 커패시터가 방전하는 동안에는 DC-link 커패시터의 앞단이 격리되기 때문에, 고장회로는 RLC 등가 직렬회로로 나타낼 수 있다.



[그림 3] DC-link 커패시터 방전에 의한 사고전류

한편, ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하는 경우, PCS의 DC-link 커패시터에 충전된 에너지가 방전함에 따라 큰 전류를 발생시킨다. 하지만, 사고전류가 변압기 및 리액터의 임피던스로 인해 감소하여 ASS가 전력용 퓨즈보다 먼저 동작하여 전체 ESS 수용가의 정전이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 도식적 수법에 의한 퓨즈 선정법과 ESS의 보호협조 운용알고리즘을 제안한다.

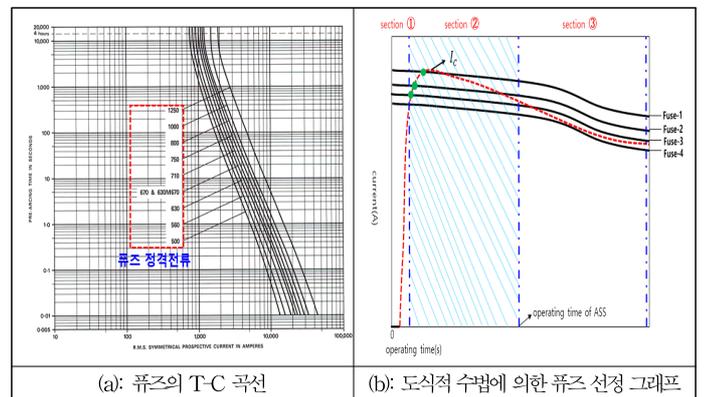
## 3. ESS의 보호협조 운용알고리즘

### 3.1 도식적 수법에 의한 퓨즈 선정 방안

직류 사고전류와 퓨즈의 T-C 동작곡선에 의한 도식적 수법을 이용하여, ASS의 동작시간과 전력용 퓨즈의 용량에 따른 차단시간을 고려한 퓨즈용량을 선정한다. 즉, 식 (1)에 의해 산정된 사고전류  $I_c$  곡선을 그림 4 (a)의 전력용 퓨즈의 T-C 동작곡선에 대입하여, 그림 4 (b)와 같이 도식적 수법에 의하여 적절한 협조시간차를 도출한다. 여기서, 그림 4 (b)의 section ①은 ASS와 전력용 퓨즈가 모두 동작하지 않는 구간을 나타내며, section ②는 사고전류와 T-C 동작 곡선사이 교점이 발생하여 전력용 퓨즈가 ASS 보다 먼저 동작하는 구간을 나타낸다. 또한, 그림 4 (b)의 section ③은 section ②와 동일하게 사고전류가 전력용 퓨즈의 T-C 동작 곡선과 교점이 발생하는 구간으로, ASS의 동작시간 이후에 해당되어 적절한 보호협조를 수행할 수 없다. 따라서, section ②를 만족하는 퓨즈들 중에서 부하전류에 용단되지 않고 ASS 보다 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리할 수 있는 퓨즈를 선정한다.

$$I_c = -\frac{I_0 w_0}{w} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{V_0}{wL} e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (1)$$

여기서,  $I_c$ : 사고 전류,  $I_0$ : 초기 전류,  $V_0$ : 초기 전압,  $w_0$ : 공진주파수,  $\delta$ : 감쇠 응답  $w$ : 각주파수,  $L$ : 인덕턴스,  $\beta$ : 위상각



[그림 4] 퓨즈의 T-C 곡선 및 퓨즈의 T-C 곡선에 의한 도식적 그래프

### 3.2 보호협조 운용 알고리즘

3.1절에서 제시한 도식적 수법을 바탕으로 ESS의 보호협조 운용알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

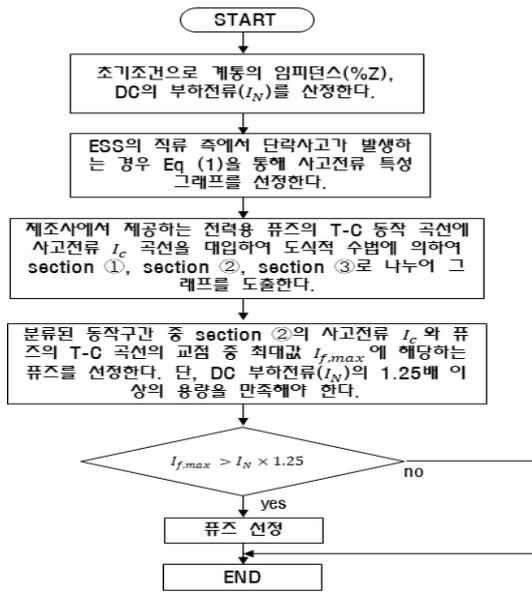
[Step 1] 초기조건으로 계통의 임피던스(%Z), DC축의 부하전류( $I_N$ )를 산정한다.

[Step 2] ESS의 직류 축에서 단락사고가 발생하는 경우, Eq (1)에 의하여 사고전류 특성 그래프를 산정한다.

[Step 3] 제조사에서 제공하는 전력용 퓨즈의 T-C 동작 곡선에 사고전류( $I_c$ ) 곡선을 대입하여, 도식적 수법에 의하여 section ①, section ②, section ③로 나누어 보호협조 특성을 분석한다.

[Step 4] [Step 3]에서 분류된 동작구간 중 section ②번 구간의 사고전류  $I_c$ 와 퓨즈의 T-C 곡선의 교점 중 최대값  $I_{f,max}$ 에 해당되는 퓨즈를 선정한다. 단, DC 부하전류( $I_N$ )의 1.25배 이상의 용량을 만족해야 한다.

상기의 알고리즘을 플로우 차트로 나타내면 그림 5와 같다.

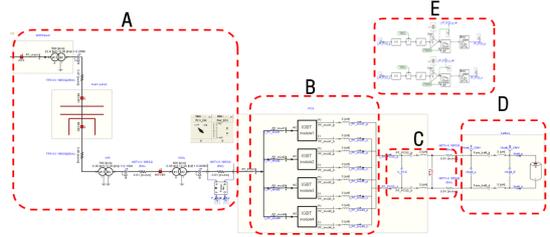


[그림 5] 보호기기 선정 알고리즘

## 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 수요관리용 ESS의 사고해석 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용한 전체 모델링을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 A부분은 ASS, PF, 메인 변압기,

IVR로 구성된 수배전설비부를 나타내고, B부분은 IGBT, 전력용 퓨즈 등으로 구성된 PCS부, C부분은 DC축 단락사고를 모의하는 사고발생 장치부를 나타낸다. 또한, 그림 6의 D부분은 배터리 랙과 DC전로로 구성된 배터리 부를 나타내며, E부분은 DC 전로 (+)극, (-)극에 설치되어 사고구간을 분리하는 전력용 퓨즈 부를 나타낸다.



[그림 6] 전체 모델링

## 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

제안한 ESS의 보호협조 알고리즘을 검증하기 위하여, 시뮬레이션 및 시험조건은 표 1과 같이 실제 사고가 발생한 수용가를 바탕으로 상정한다.

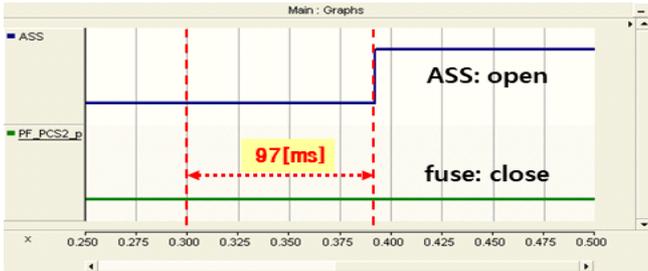
[표 1] 시뮬레이션 조건

items	components	contents
switch gear section	ASS	25.8kV, 200A/15kA
	M.TR(Δ-Y)	500kVA, 22.9/0.38kV %Z: 5.43%Ω
	MCCB 1,2	6.4kA/42kA
	MCCB 3	3kA/65kA
	IVR	750kVA 0.38kV/0.38kV %Z: 6%Ω
PCS section	isolation TR(Δ-Y)	600kVA, 0.38kV/0.38kV %Z: 5.09%Ω
	AC module fuse	315A/100kA
	DC main fuse	500A*2/100kA
battery section	IGBT	switching frequency: 4kHz
	battery	50S/1P 1000V, 200kWh 174mΩ

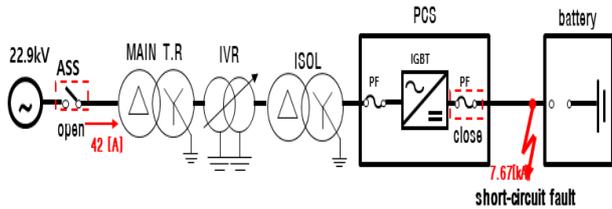
### 5.2 수용가 임피던스의 크기에 따른 퓨즈의 동작특성

5.1의 시뮬레이션 조건하에서 단락사고가 발생한 경우, 수용가의 전력용 퓨즈의 동작 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 사고가 발생한 수용가는 그림. 8과 같이 3대의 변압기가 직렬로 설치되어 있어, 임피던스의 크기가 증가하여 사고전류가 감소하므로, 기존에 설치된 1,000 [A]용 전력용 퓨즈는 작아진 사고전류와 T-C 동작특성에 의해 퓨즈 동작까지 긴 시간이 소요되지만, 계통 측에 설치된 ASS는 97 [ms]에 먼저 동작하여, 수용가의 정전을 발생시킬 가능성이 있음을 알 수

있다. 즉, 단락사고가 발생하면 ASS가 설정치 사고전류를 검출하여 동작하는 속도가 DC 전로 측 전력용 퓨즈보다 빠르므로 전력용 퓨즈가 사고구간을 신속하게 분리하지 못해 ASS가 먼저 개방되어 정전이 발생함을 알 수 있다.

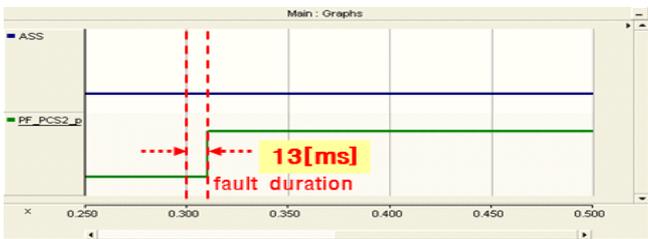


[그림 7] 수용가의 변압기 세 대 설치 시 ASS 및 퓨즈 동작 특성

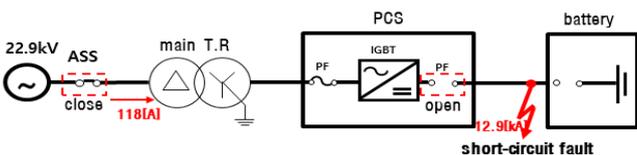


[그림 8] 수용가의 변압기 세 대 설치 시 ASS 및 퓨즈 동작 개념도

또한, 수용가 계통의 임피던스 크기에 따른 사고전류의 특성을 분석하기 위하여, 기존의 3대의 변압기에서 1대의 메인 변압기만 설치된 경우를 상정하여 사고전류의 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 10과 같이 1대의 변압기가 설치된 경우에는 임피던스가 감소하여 사고전류가 증가하게 되므로 전력용 퓨즈는 T-C 동작 특성에 따라 13[ms]에 동작하게 되어, 97[ms]에 동작하는 ASS 보다 먼저 동작하여, 수용가에 정전이 발생하지 않음을 알 수 있다. 즉, ESS의 DC 전로 측에 단락사고가 발생하게 되면 ASS가 설정치의 사고전류를 검출하여 동작하기 전에 DC 전로 측에 설치된 전력용 퓨즈가 먼저 동작하여 사고구간을 분리하므로 ASS는 개방되지 않고 광범위한 정전을 피할 수 있다.



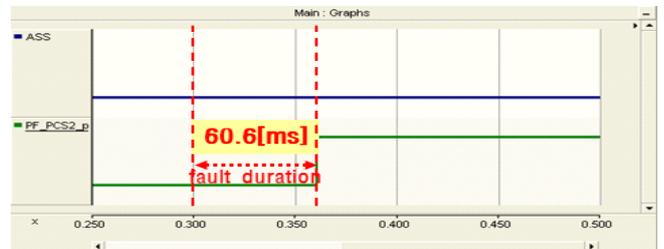
[그림 9]수용가의 변압기 1 대 설치 시 ASS 및 퓨즈 동작 특성



[그림 10]수용가의 변압기 1 대 설치 시 ASS 및 퓨즈 동작 개념도

### 5.3 제안한 보호협조 운용알고리즘에 의한 퓨즈 동작 특성

ESS 수용가의 임피던스 크기에 의해 사고전류가 감소하여 ASS가 먼저 동작하는 문제점을 해결하기 위하여, 3장에서 제시한 보호협조 운용알고리즘을 통해 부하전류에는 동작하지 않고 단락 시에 사고구간을 분리할 수 있는 퓨즈를 선정한다. 여기서, 선정된 퓨즈에 대하여 보호협조 특성을 나타내면 그림 11과 같다. 이 그림에서와 같이 단락사고가 발생하면 알고리즘에 의해 선정된 퓨즈는 60.6 [ms]에 동작하므로 ASS의 동작시간인 97 [ms]보다 빠르게 동작함을 알 수 있다. 따라서, 수용가 ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생해도 적정하게 선정된 퓨즈에 의하여 사고구간을 신속하게 분리하여 수용가의 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 11] 제안한 보호협조 운용알고리즘에 의한 퓨즈 동작 특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 ESS의 직류 측에서 단락사고 발생 시 ASS가 전력용 퓨즈보다 먼저 동작하는 문제를 해결하기 위하여 도식적 수법 및 보호협조 운용알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 선정된 퓨즈는 60.6[ms]에 동작하고 ASS는 97[ms]에 동작하므로, 제안한 도식적 수법 및 알고리즘을 통해 퓨즈를 선정하면 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)와 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구[S2854105]에 의하여 수행되었음.

### 참 고 문 헌

[1] S. Y. Lim, S. Y Park, S. H. Yoo, "The Economic Effects of the New and Renewable Energies Sector".Journal of Energy Engineering ,vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014.