

수요관리용 ESS가 설치된 고압 수용가의 보호협조기기 운용알고리즘에 관한 연구

최성문¹, 신건¹, 김미영², 손준호³, 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교, ²호원대학교, ³LG전자

Operation Algorithm for Protection Cooperation Device in High Voltage Customer with ESS for Demand Management

Sung-Moon Choi¹, Shen Jian¹, Mi-Young Kim², Joon-Ho Son³, Dae-Seok Rho^{1*}
¹Korea University of Technology and Education, ²Howon University, ³LG Electronics

요약 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 퓨즈보다 ASS가 먼저 동작하여 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 수행하며, 이를 바탕으로 보호협조 시험장치를 구현한다. 한편, 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하는 경우 제한한 도식적 수법에 의해 적정한 퓨즈를 선정하면, ASS 보다 전력용 퓨즈가 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리하고 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

Abstract High voltage customers with ESS for peak management are required to install protection devices of ASS (auto section switch) at the power coupling point. This installation is necessary to isolate the fault section through protection coordination with reclosers installed at the power company (KEPCO). However, a blackout at the customer side may occur as ASS can be operated ahead of the protection device of the power fuse at the fault location due to the fault current reduction. This fault current reduction occurs as the short circuit fault current at the DC side of the ESS may be decreased by the impedance of the distribution transformers. Therefore, this paper presents an operation algorithm for the protection cooperation using a graphic solution method that isolates the fault section by operating the power fuse even with a low fault current. In addition, modeling of the entire system composed of switching gear section, PCS section, battery section, and DC fault generator section is performed by PSCAD/EMTDC. Finally, a testing device for protection cooperation is also implemented based on the proposed algorithm. From the simulations and test results, it is found that the blackout, which is caused by a short circuit at the DC side of ESS, can be prevented by selecting the proper power fuse. The power fuse selection, in turn, is based on the proposed graphic solution method that operates the power fuse ahead of ASS.

Keywords : ASS, ESS, Power Fuse, Grapic Solution Method, Protection Cooperation Algorithm, DC Fault, PSCAD/EMTDC Software

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20206910100090)와 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 [S2854105] 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received September 9, 2021

Revised October 19, 2021

Accepted December 6, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

최근, 환경오염과 기후변화 문제를 해결하기 위하여, 신재생에너지의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 ESS(energy storage system)가 설치되고 있다[1-3]. 특히, 피크저감용 ESS를 운용하고 있는 300 KVA 이상 1,000 KVA이하 특 고압 고객수전설비에는 수용가의 인입점에 ASS(auto section switch) 보호장치를 의무적으로 설치하고 있다. 여기서, ASS는 설정 값 미만의 사고전류를 자동적으로 차단하는 보호동작을 수행하며, 설정 값 이상의 사고전류가 흐르는 경우, 전력회사의 보호장치(recloser 혹은 변전소 CB)와 협조하여 무 전압 상태에서 차단기의 접점을 개방해 사고구간을 분리한다[4,5]. 하지만, ESS의 절연파괴 및 작업자의 설치부주의로 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.

따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, DC 사고전류와 퓨즈의 T-C 동작곡선에 의한 도식적 수법을 이용하여, ASS의 동작시간과 전력용 퓨즈의 차단시간을 고려하여 선정하고, 이를 바탕으로 ESS의 고압 수용가의 보호협조 운용알고리즘을 제안한다. 또한, ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하는 경우의 보호협조 특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 수배전설비부, 메인 분전반 부, PCS부, 배터리 부, 퓨즈 부, 직류 측 사고발생 장치 부로 구성된 수요관리용 ESS의 사고해석 모델링을 수행하고, 보호협조 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, 기존 방식에서는 ASS가 전력용 퓨즈 보다 먼저 동작하여 수용가 전체에 정전이 발생하지만, 제안한 도식적 수법 및 보호협조 운용알고리즘에 의해 선정된 퓨즈를 설치하면 ASS 보다 전력용 퓨즈가 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리하고 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

2. ESS의 직류전로 단락사고에 의한 정전사태 분석

2.1 수요관리용 ESS 수용가의 구성

ESS의 직류 측 단락사고로 인하여 정전이 발생한 ESS 수용가계통은 Fig. 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.

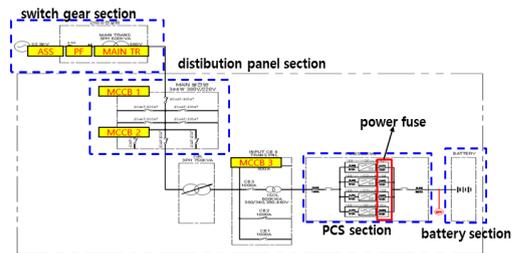


Fig. 1. Configuration of customer facility with ESS

2.2 ESS의 직류 측 단락사고에 의한 정전사태

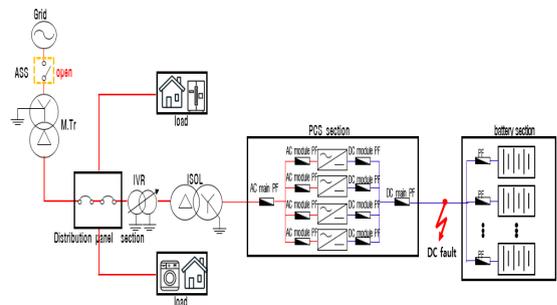


Fig. 2. Concept of short circuit fault at DC side of ESS

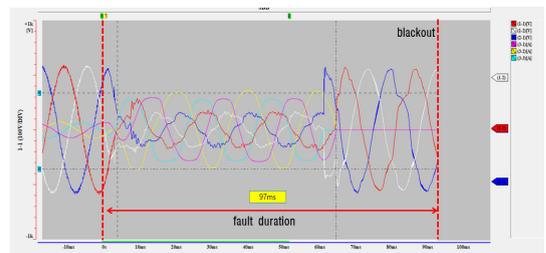


Fig. 3. Blackout due to short circuit at DC side of ESS

일반적으로, ESS의 직류 측 전력용 퓨즈는 DC 전로의 보호를 위하여 설치되고, 절연파괴나 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. Fig. 2는 ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생한 경우를 나타낸 것으로, 이 그림에서와 같이 사고전류가 큰 임피던스에 의해 감소되어 ASS가 DC 측의 전력용 퓨즈 보다 먼저 동작하여, 수용가 전체에 정전을 야기할 가능성이 있다. 또한, Fig. 3은 상기의 감소된 사고전류에 의하여 정전이 발생한 수용가의 전압 및 전류를 측정할 것으로, 이 그림에서와 같이 ASS는 설정치 이상의 전류가 흐르면 97 [ms]에 동작하여 수용가 전체의 정전이 발생함을 알 수 있다.

2.3 ESS의 직류 측 단락전류 특성

ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생하면 Fig. 4와 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[6-10].

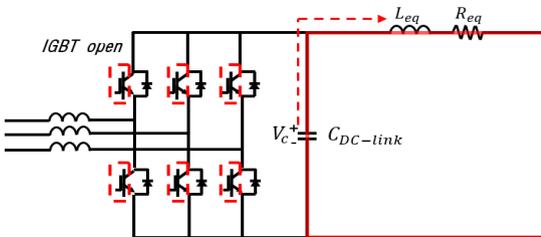


Fig. 4. DC-link Fault current by discharging of DC-link capacitors

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 선정 법과 ESS의 보호협조 운용알고리즘을 제안한다.

3. ESS의 보호협조 운용알고리즘

3.1 도식적 수법에 의한 퓨즈 선정 방안

ESS의 DC 전로 측에서 단락사고 발생하는 경우, 상기에서 언급한 문제점으로 인해 적절한 보호협조가 이루어지지 않을 가능성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 직류 사고전류와 퓨즈의 T-C 동작곡선에 의한 도식적 수법을 이용하여, ASS의 동작시간과 전력용 퓨즈의 용량에 따른 차단시간을 고려한 퓨즈용량을 선정한다. 즉, Eq (1)에 의해 산정된 사고전류 I_c 곡선을 Fig. 5의 전력용 퓨즈의 T-C 동작곡선에 대입하여, Fig. 6과 같이 도식적 수법에 의하여 적절한 협조시간차를 도출한다. 여기서, Fig. 6의 section ①은 ASS와 전력용 퓨즈가 모두 동작하지 않는 구간을 나타내며, section ②는 사고전류와 T-C 동작 곡선 사이에 교점이 발생하여 전력용 퓨즈가 ASS 보다 먼저 동작하는 구간을 나타낸다. 또한, Fig. 6의 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 용납되지 않고 ASS 보다 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리할 수 있는 퓨즈를 선정한다.

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

where, I_c : fault current, I_0 : initial current, V_0 : initial voltage, w_0 : resonant frequency, δ : damping frequency, w : angular frequency, L : inductance, β : phase angle

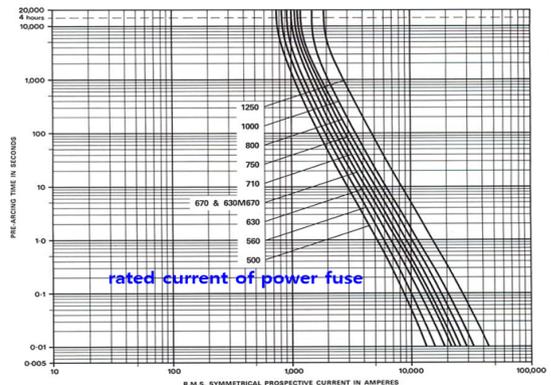


Fig. 5. TCC curve of power fuse

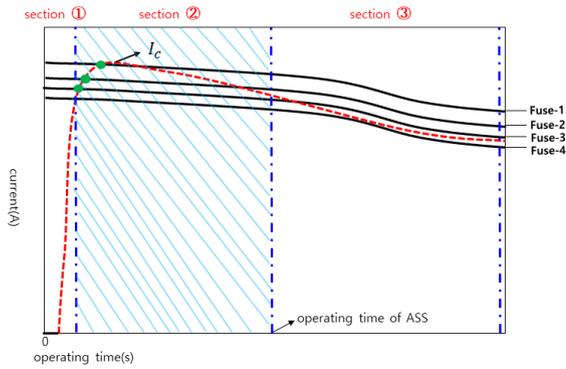


Fig. 6. Graphic solution considering DC fault current and TCC curve of power fuse

3.2 보호협조 운용 알고리즘

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

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

[Step 2] ESS의 직류 측에서 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 Fig. 7과 같다.

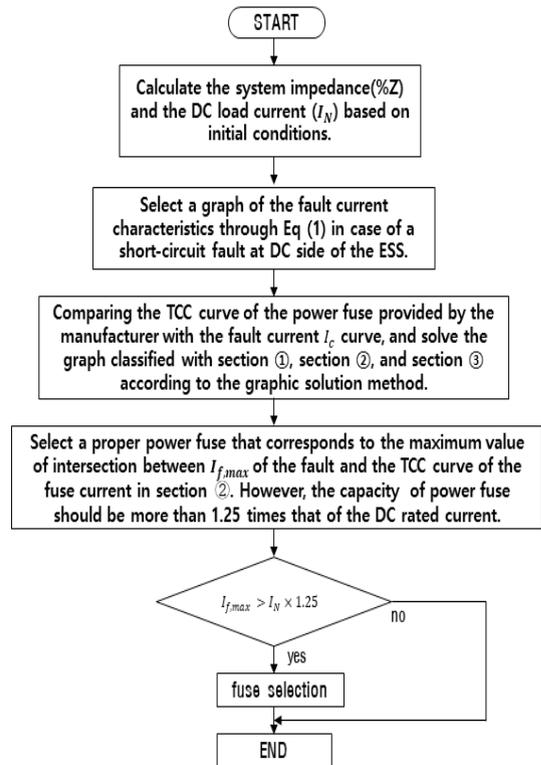


Fig. 7. Selection algorithm of protection device

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 수요관리용 ESS의 사고해석 모델링

4.1 수배전설비 부 모델링

ESS가 설치된 수용가의 수배전설비 부는 Fig. 8과 같이 ASS, 전력용 퓨즈, 메인 변압기, MCCB, IVR로 구성된다. 여기서, ASS는 설정 값 미만의 사고전류를 자동으로 차단하고, 설정 값 이상의 사고전류가 흐르는 경우, 무전압 상태에서 차단기의 접점을 개방하여 사고전류를 제거하는 역할을 수행한다. 또한, 전력용 퓨즈는 사고전류가 발생한 경우 사고 구간을 신속하게 분리하며, 메인 변압기는 특 고압 및 고압을 저압으로 변압하는 목적으로 사용된다. 한편, MCCB는 과부하 및 단락 등의 이상 발생 시 전류를 차단하는 역할을 수행하며, IVR은 상용 전원으로부터 공급되는 전압변동을 자동적으로 조정하여, 부하에 일정한 전압을 공급한다.

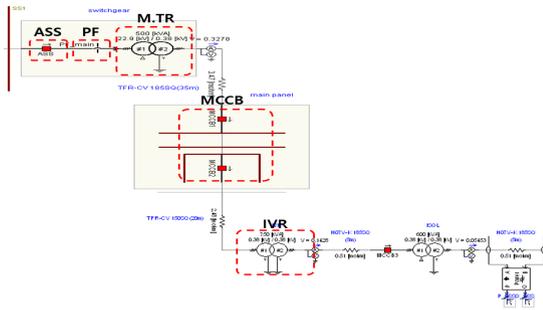


Fig. 8. Modeling of switch gear section

4.2 PCS부 모델링

배터리의 충·방전 기능을 가진 PCS는 Fig. 9와 같이 4개의 IGBT 모듈, 전력용 퓨즈, 등으로 구성된다. 여기서, IGBT 모듈은 DC 전원을 120° 위상차를 갖는 3상 AC로 변환하고, 전력용 퓨즈는 각 모듈마다 설치되며, 사고구간을 신속하게 분리한다.

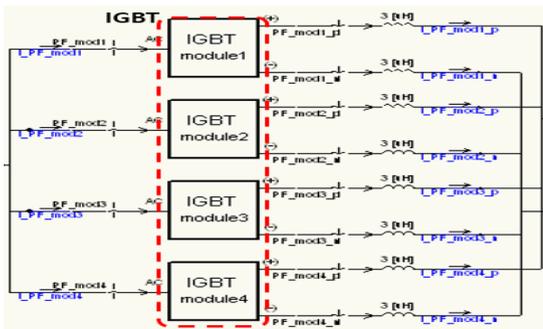


Fig. 9. Modeling of PCS section

4.3 배터리부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배터리 부를 모델링하면 Fig. 10과 같다. 배터리 부는 배터리 및 전력용 퓨즈

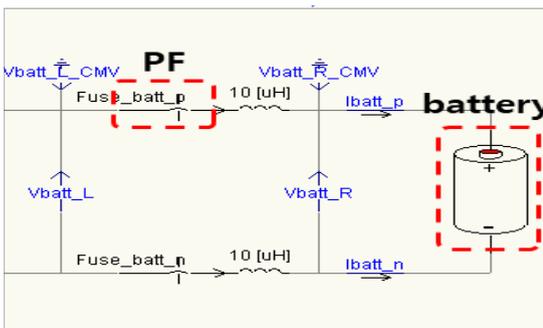


Fig. 10. Modeling of battery section

로 구성되고, 배터리는 내부 임피던스와 기생 커패시턴스, 전압원으로 구성되며, 배터리의 내부 임피던스는 2.9[mΩ], 전체 배터리 부 용량은 250[Ah]로 상정한다.

4.4 DC 전로용 전력용 퓨즈 부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 전력용 퓨즈를 모델링하면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이 전력용 퓨즈 부는 (+)극, (-)극으로 구성되며, PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 비교기를 사용하여 적산된 사고전류 값이 제조사에서 제공하는 퓨즈 용량 보다 큰 경우 퓨즈를 동작시키도록 제어회로를 구성한다.

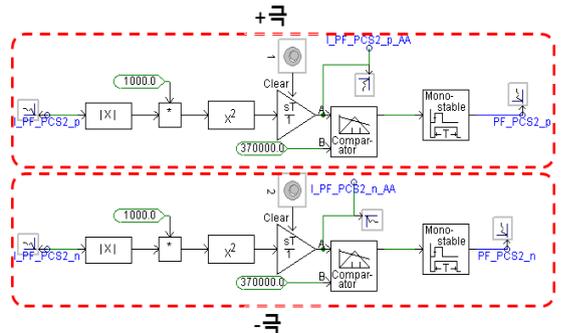


Fig. 11. Modeling of power fuse section

4.5 직류 측 사고발생 장치부 모델링

직류 측에서 단락사고를 발생시키는 사고 발생 장치부를 나타내면 Fig. 12와 같다. 이 그림에서와 같이 ESS의 직류 전로 (+)와 (-)를 단락하여 직류전로 사고상태를 모의한다.

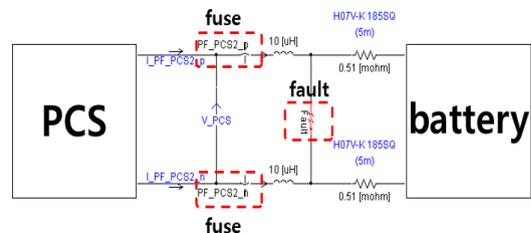


Fig. 12. Modeling of fault generator device of DC side

4.6 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 종합하여, 전체 시스템을 나타내면 Fig. 13과 같다. 여기서, Fig. 13의 A부분은 ASS, PF, 메인 변압기, IVR로 구성된 수배전설비부를 나타내고, B

부분은 IGBT, 전력용 퓨즈 등으로 구성된 PCS부, C부분은 DC측 단락사고를 모의하는 사고발생 장치 부를 나타낸다. 또한, Fig. 13의 D부분은 배터리 랙과 DC전로로 구성된 배터리 부를 나타내며, E부분은 DC 전로 (+)극, (-)극에 설치되어 사고구간을 분리하는 전력용 퓨즈 부를 나타낸다.

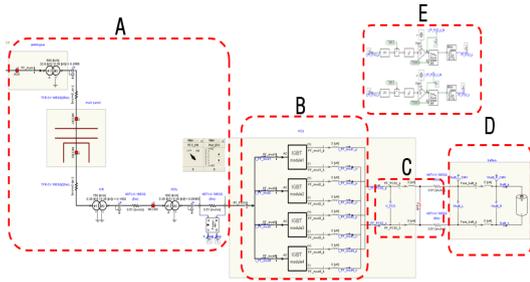


Fig. 13. Modeling of entire system

5. 보호협조 시험장치 구현

본 논문에서는 ESS의 직류전로에서 단락사고가 발생하는 경우, 보호협조 특성을 분석하기 위하여 ASS, 메인 변압기, IVR, 전력용 퓨즈, PCS 부, 배터리 부, DC 단락용 전자접촉기 등으로 구성된 보호협조 시험장치를 나타내면 Fig. 14와 같다. 이 그림에서와 같이, ASS는 설정치 이상의 전류가 흐르면 동작하고, 메인 변압기는 계통으로부터의 특 고압 및 고압을 저압으로 변압하는 목적으로 사용된다. 또한, IVR은 상용전원으로부터 공급되는 전압변동을 자동적으로 조정하여, 부하에 일정한 전압을 공급한다. 한편, 전력용 퓨즈는 사고전류가 발생한 경우 사고 구간을 신속하게 분리하는 역할을 하며, PCS는 직류 전원을 3상 AC로 변환하고, 배터리 부는 저장된 전기 에너지를 이용하여 수용가의 전력피크를 저감하는 역할을 수행한다. 한편, 직류 단락용 전자접촉기는 직류 측을 단락시키는 역할을 수행한다.

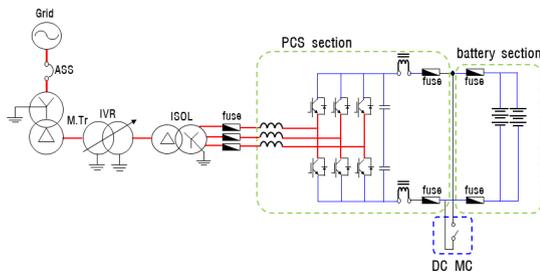


Fig. 14. Modeling of protection coordination device

6. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

6.1 시뮬레이션 및 시험조건

제한한 ESS의 보호협조 알고리즘을 검증하기 위하여, 시뮬레이션 및 시험조건은 Table 1과 같이 실제 사고가 발생한 수용가를 바탕으로 상정한다. 여기서, 수용가측 수배전설비 부의 메인 변압기 용량은 500 [KVA], 부하 전류는 12 [A], ASS의 최소 동작전류의 설정치는 부하 전류의 2~3배를 적용하므로 30[A]로 상정한다. 또한, 전력용 퓨즈는 Fig. 1의 정전사고가 발생한 수용가 사례와 마찬가지로 2개의 500 [A] 퓨즈를 병렬로 연결하여 구성한다. 한편, 배터리부의 전압은 1,000 [V], 용량은 200 [kWh], 총 내부저항은 174 [mΩ]이며, PCS의 스위칭 주파수는 4 [kHz]로 상정한다.

Table 1. Test and simulation conditions

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
	isolation TR(Δ-Y)	600kVA, 0.38kV/0.38kV %Z: 5.09%Ω
PCS section	AC module fuse	315A/100kA
	DC main fuse	500A*2/100kA
	IGBT	switching frequency: 4kHz
battery section	battery	50S/1P 1000V, 200kWh 174mΩ

6.2 PSCAD/EMTDC에 의한 수용가 보호협조 특성

6.2.1 수용가의 단락사고 전류특성

상기의 실제 사고가 발생한 수용가의 퓨즈 설치 조건을 바탕으로 ESS의 DC 전로 측에 단락사고가 발생한 경우, 사고전류 특성을 나타내면 Fig. 15와 같다. 여기서, 메인 분전반에 설치된 MCCB 1, MCCB 2 및 IVR 전로에 설치된 MCCB 3는 트립 전류인 6.2 [kA]보다 작은 2.45 [kA]의 사고전류가 흐르므로 MCCB가 설치되어도 작아진 사고전류에 의해 트립 되지 않지만, ASS는 42

[A]의 사고전류로 인하여 97 [ms]에 트립 되어 정전사고 발생함을 알 수 있다. 또한, Fig. 16과 같이, AC측 전력용 퓨즈에 흐르는 전류는 575 [A]로 트립 전류인 315[A]보다 크므로 AC측 전력용 퓨즈가 트립 될 수 있지만, T-C 동작 특성에 의해서 트립 시간이 8초 정도 소요되며, DC측 전력용 퓨즈에 흐르는 전류는 약 1,800 [A]가 흐르는 것을 알 수 있다.

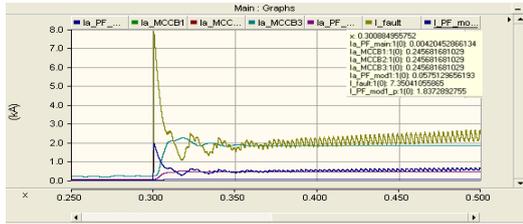


Fig. 15. Characteristics of short circuit fault current at DC side of ESS

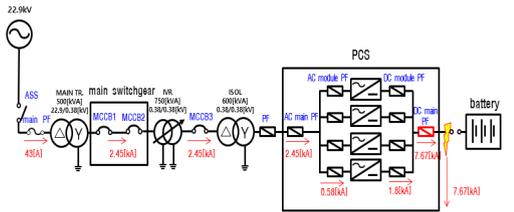


Fig. 16. Fault current flow for short circuit at DC side of ESS

6.2.2 수용가 임피던스의 크기에 따른 퓨즈의 동작특성

6.2.1의 시뮬레이션 조건하에서 단락사고가 발생한 경우, 수용가의 전력용 퓨즈의 동작 특성을 나타내면 Fig. 17과 같다. 여기서, 사고가 발생한 수용가는 Fig. 18과 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.

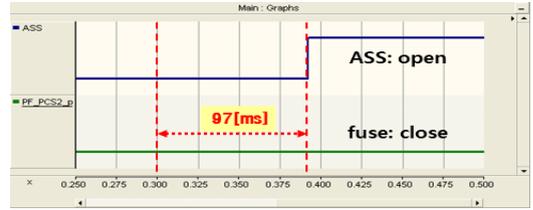


Fig. 17. Operation characteristics of ASS and fuse for 3 distribution transformers

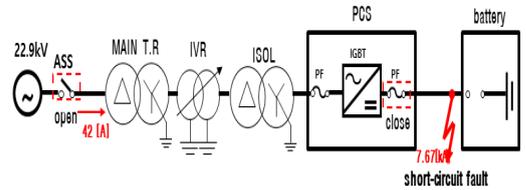


Fig. 18. Operation conceptual diagram of ASS and fuse for 3 transformers

또한, 수용가 계통의 임피던스 크기에 따른 사고전류의 특성을 분석하기 위하여, 기존의 3대의 변압기에서 1대의 메인 변압기만 설치된 경우를 상정하여 사고전류의 특성을 나타내면 Fig. 19와 같다. 여기서, Fig. 20과 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 단락 사고가 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.

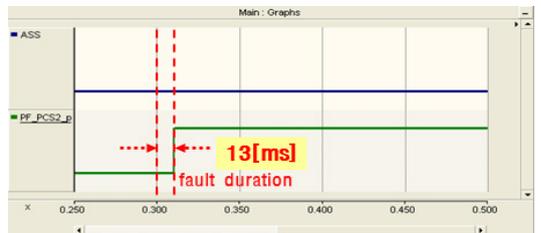


Fig. 19. Operation characteristics of ASS and fuse for 1 distribution transformer

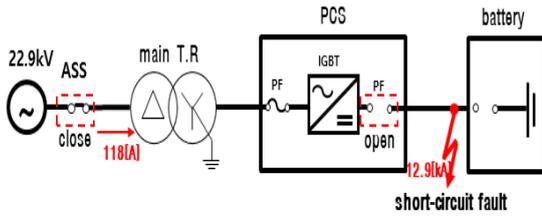


Fig. 20. Operation conceptual diagram of ASS and fuse for 1 transformer

6.2.3 제안한 보호협조 운용알고리즘에 의한 수용가 보호협조 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 Fig. 21과 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 적절하게 선정된 퓨즈에 의하여 사고구간을 신속하게 분리하여 수용가의 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

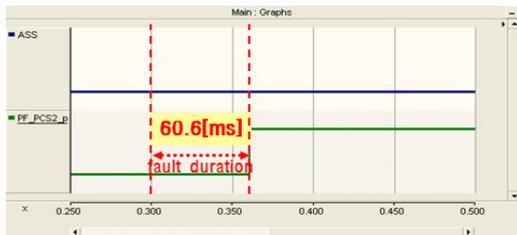


Fig. 21. Fuse operation characteristics of the proposed algorithm

6.3 보호협조 시험장치에 의한 수용가 보호협조 특성

ESS의 DC 전로 측 단락사고 특성을 분석하기 위해, 5장에 구현한 보호협조 시험장치에 의하여 단락 사고 특성을 나타내면 Fig. 22와 같다. 이 그림에서와 같이 보호협조 시험장치의 DC 전로 측 단락용 전자접촉기를 사용하여 단락사고를 모의하면 전력용 퓨즈는 낮은 사고 전류에 의해 동작하지 않지만, ASS는 100 [ms]에 동작하여 수용가의 정전을 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 보호협조 시험장치의 결과와 PSCAD/EMTDC에

의한 시험결과가 유사함을 알 수 있고, 낮은 사고전류와 ASS의 동작시간을 고려한 최적의 퓨즈를 선정해야 함을 알 수 있다.

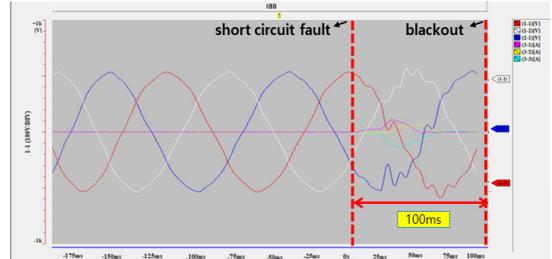


Fig. 22. Characteristics of short circuit fault current at the DC side of ESS by the test device

6.4 종합 분석

6.2항과 6.3항을 바탕으로 수요관리용 ESS가 설치된 고압수용가의 보호협조운용특성을 Table 2와 같다. 여기서, 기존 방식은 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. 또한, 제안한 보호협조 운용알고리즘 및 도식적 수법에 의해 퓨즈를 선정하게 되면 알고리즘에 의해 선정된 퓨즈는 60.6 [ms]에 동작하므로 ASS의 동작시간인 97 [ms]보다 빠르게 동작함을 알 수 있다. 한편, 추가적인 방안으로 수용가의 변압기가 한 대 운용되는 경우는 계통 임피던스가 크게 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 있지만, 고압수용가에 한 대의 변압기만 설치하는 것은 현실적이지 않으므로 고려하지 않는다. 따라서, 기존 방식에서는 ASS가 전력용 퓨즈 보다 먼저 동작하여 수용가 전체에 정전이 발생하지만, 제안한 도식적 수법 및 보호협조 운용알고리즘에 의해 선정된 퓨즈를 설치하면 ASS 보다 전력용 퓨즈가 먼저 동작하여 사고구간을 신속하게 분리하고 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Operation characteristic of ASS and power fuse according to impedance

item		operating time of ASS	operating time of fuse	blackout occurrence
existing method	$T_r \times 3$ [EA]	97[ms]	-	O
proposed method	$T_r \times 3$ [EA]	97[ms]	61[ms]	X
extra method	$T_r \times 1$ [EA]	97[ms]	13[ms]	X

7. 결론

본 논문에서는 수용가용 ESS의 직류 측에서 단락사고가 발생하는 경우, DC 전로 측에서 발생한 사고전류가 계통의 임피던스로 인해 감소하여, 전력용 퓨즈의 보다 ASS가 먼저 동작한 문제를 해결하기 위하여 낮은 사고전류에도 퓨즈가 동작하여 사고구간을 분리할 수 있도록 도식적 수법에 의한 보호협조 운용알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 보호협조 시험장치를 구현하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사고가 발생한 수용가는 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.
- (2) 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, 수용가의 광범위한 정전을 피할 수 있음을 알 수 있다.
- (3) 제안한 보호협조 운용알고리즘을 통해 선정된 퓨즈는 단락사고 발생 시 60.6 [ms]에 동작하므로 ASS의 동작시간인 97 [ms]보다 빠르게 동작하므로, 수용가 ESS의 DC 전로 측에서 단락사고가 발생해도 적정하게 선정된 퓨즈에 의하여 사고구간을 신속하게 분리하여 수용가의 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

References

- [1] Hun Lee, Will the use of renewable energy in the enterprise expand : 185 companies worldwide including Google GM Apple_Government, October Green Support for joining RE100, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25-28, 2019.8.
- [2] 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. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.4.031>
- [3] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, "ESS utilization and related PCS technology", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 12-18, 2017.1.
- [4] Excellent News, "Operational characteristics of ASS", <https://excellent-news.tistory.com/15>
- [5] E.S. Kim, S.G Kim, "A Protection Algorithm of Grid-Interactive Photovoltaic System Considering Operation Characteristics of Recloser", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 280-286, 2006.5.
- [6] C.H. Woo, T.H Han, "The Development of ASS Controller Using DSP", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 142-147, 2004.9.
- [7] S.D. Cho, H.D Lee, J. Shen, D.S Rho, "A Study on Mechanisms and Modeling of Leakage Current in Sharing ESS".Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers ,vol. 70, no. 4, pp. 611-618, 2021.4. DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.4.611>
- [8] D.H. Tae, H.D, Lee, J.M, Kim, D.S, Rho, "Characteristics of Saturation and Circulating Current Based on Winding and Iron Core Structure of Grid-connected Transformer in Energy Storage System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society ,vol. 21, no. 4, pp. 39-48, 2020.4. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.39>
- [9] J.M. Kim, D.H. Tae, I.M, Lee, G.P, Lim, D.S, Rho, "A Study on Modeling of Leakage Current in ESS Using PSCAD/EMTDC", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society ,vol. 22, no. 2, pp. 810-818, 2021.2. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.810>
- [10] J.M Kim, H D Lee, D-H Tae, D-S Rho, "A Study on Fault Analysis Modeling of 5kV MV-LVDC Off-grid Micro Grid System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.22, No. 9, pp. 745-753, 2021.9. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.9.745>

최 성 문(Sung-Moon Choi)

[준회원]



- 2020년 2월 : 호원대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 석사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, ESS, 마이크로그리드, 신재생에너지

손 준 호(Joon-Ho Son)

[준회원]



- 2009년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 12월 : 일본 북해도대학교 대학원 정보과학연구과 (공학박사)
- 2016년 12월 ~ 현재 : LG 전자 ESS사업부 ESS영업/엔지니어링팀 재직

<관심분야>

전력/배전계통 해석, ESS/분산전원 최적운영, 수요자원거래시장

신 건(Jian Shen)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, MVDC, 신재생 에너지, micro-grid, ESS

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

김 미 영(Mi-Young Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2008년 12월 : 일본 북해도대학 시스템공학과 (공학박사)
- 2009년 8월 ~ 2014년 12월 : 한국 선급 책임연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전력계통, 풍력 전기설비, 분산전원 계통연계