

접지방식이 상이한 철도배전계통의 연장급전을 위한 전기적 특성분석

Analysis of electric characteristics for extension power supply between different grounding railway distribution system

정호성* 한문섭* 이장무* 권삼영** 박현준**
Hosung Jung Moonseob Han Changmu Lee Samyoung Kwon HyeunJun Park

ABSTRACT

This paper presents electric characteristics analysis and safe configuration for extension power supply between existent 6.6kV ungrounded distribution system and establishment and improvement 22.9kV direct grounding distribution system. For this, we model 6.6kV ungrounded and 22.9kV direct grounding distribution system of urban underground, ground region, and rural electrical, unelectrical region using PSCAD/EMTDC and analyze voltage drop, charging current, ground and short fault through simulation. To analyze electric characteristics of extension power supply, we simulate extension power supply of overhead line of 6.6kV ungrounded system and underground line of 22.9kV direct grounding system of rural electrical region and propose operation condition for safe extension power supply through result of analysis. Characteristics of voltage drop, charging current, ground and short fault appear almost similarly with electrical characteristic of direct power supply. However, because unbalance of phases may cause relay's malfunction of ungrounded system and ground fault current of direct grounding system may damage facilities of ungrounded system, we propose safe system configuration such as impedance grounding system of neutral point.

1. 서론

철도고압배전계통은 신호전원과 역사조명 및 동력, 전자계산기 설비 등에 전원을 공급해 주는 설비이며, 열차운행과 서비스 측면에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 하지만 철도에 적용되고 있는 고압배전계통은 일반 전력회사의 고압배전계통과 달리 양단에 전원을 가지며, 궤도에 평행하게 설치되며 분기회로가 거의 없는 직선형태의 구조로 구성되어 있다. 또한 배전거리가 10~40km 정도로 비교적 장거리이며, 운전보안, 여객의 안전수송에 중대한 책무를 담당하고 있다. 또한 접지방식에서도 일반적인 전력계통의 고압배전계통이 22.9[kV] 직접접지방식(다중접지)이 주류인데 반해, 철도고압배전계통의 경우에는 6.6[kV] 비접지방식이 널리 적용되고 있다[1~3].

* 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 책임연구원, 정회원

비접지 계통은 지락사고시에 사고전류가 작아 약전선로에 유도장애 영향이 적으며 대지전압이 낮아 유지관리가 쉬어 철도고압배전계통에 널리 적용중이다. 하지만 부하가 증가됨에 따라 전압강하가 심해지고 지중화에 따른 충전전류 증가로 인해 승압, 선로교체, 증설 등의 대책이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 최근 들어 신설되는 철도고압배전계통이나 노후 설비 개량시에는 기존의 6.6[kV] 비접지방식에서 22.9[kV] 중성점 접지방식으로 변경되고 있어 일부 구간에서는 비접지방식과 중성점 접지방식이 혼재되어 구성되고 있다. 이와 같이 비접지방식과 중성점 접지방식이 동일 구간에 적용됨에 따라 전력공급의 신뢰성을 향상시키기 위해 상이한 접지방식간에 연장급전이 요구된다. 따라서 상이한 접지방식간의 연장공급에 대한 전기적인 특성 분석이 매우 중요하다.

본 논문에서는 전력계통 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 현재 운영중인 6.6[kV] 비접지방식과 22.9[kV] 직접접지방식, 그리고 상호간 연장급전시 전기적 특성을 분석하기 위해서 전압강하, 충전전류, 고장현상 등의 다양한 전기적 특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 안정적인 연장급전을 위한 방안을 제시하였다.

2. 본 문

2.1 PSCAD/EMTDC를 이용한 철도 고압배전계통 시뮬레이션

철도고압배전계통의 경우에 기존선에서는 6.6kV 비접지방식이 고속선에서는 22kV 비접지방식이 널리 적용중이다. 한국전력 배전계통이 22.9kV 다중접지방식인데 반해 비접지 방식을 적용하는 이유는 통신유도장애가 없으며, 지락사고시 사고전류가 작아 인접 약전선로에 장애를 줄 우려가 줄어들기 때문이다. 하지만 배전설비의 용량이 점차로 커짐에 따라 철도 고압배전계통에서도 전압강하 작고, 배전용량이 커 배전거리를 길게 할 수 있으며, 절연계급을 낮출 수 있고, 지락사고 검출이 용이한 22.9kV 직접접지방식으로 교체되고 있다. 또한 현재 수도권을 비롯한 주요 배전선로의 경우에는 정전이나 배전선로 사고에 대비해 2회선 또는 3회선의 이중화된 고압배전선로를 구성하여 운영하고 있으나, 수도권 이외의 대부분의 선로에서는 1회선으로 구성되어 있다. 1회선으로 구성된 배전선로의 경우에 수전 변전소의 고장은 곧바로 배전설비의 전력공급에 차질을 빚어 열차 운행에 막대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 배전선로의 이중화는 뿐만 아니라 인근 수전 변전소의 고장을 대비한 연장급전이 고려되어야 한다.

전력계통 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 접지방식에 따른 철도 고압배전계통의 전기적인 특성을 분석하기 위하여 표 1과 같이 수도권내 지하, 지상구간과 수도권의 전철, 비전철구간으로 고압배전계통을 나누었다[4,5].

표 1. 철도 고압배전계통

대상		전체거리 [km]	역		부하 [kW]	
			역간거리	역 갯수	3상	단상
수도권내	지하전철구간	5.7	1.9km	3	335.8	33.6
	지상전철구간	13.3	1.9km	7	99.8	10.0
수도권외	전철구간	41.6	5.2km	8	34.0	3.4
	비전철구간	33.5	6.7km	5	19.6	2.0

표 1에서와 같이 4개의 배전계통에 대해 배전방식을 22.9kV 직접접지방식과 6.6kV 비접지방식으로 시뮬레이션을 수행하였다. 배전선로는 1회선이며 지중선로인 경우에는 CV 케이블 60mm²로 가공선로인 경우에는 ACSR 95mm²로 모델링하였으며 최악의 운전조건을 상정하기 위해서 각 역은 최대부하설비로 운전된다고 가정하였다.

그림 1은 각 배전계통에 대한 전압강하 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 전압공급규정에 의하면 고압이상의 선로에서의 전압강하가 10%미만으로 유지되어야 한다. 22.9kV 직접접지방식에

서의 전압강하가 최대 3.4%이내였으나, 6.6kV 비접지방식에서 최대 27.08%의 전압강하가 발생하였으며, 수도권 지하, 지상구간, 수도권의 전철구간은 전압강 기준을 만족하지 못한다는 것을 알 수 있다. 그림 2는 충전전류 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 무부하 충전전류에 대한 차단 한계규정은 7.2kV급 케이블에서는 10[A], 25.8kV급 케이블에서는 31.5[A]로 규정하고 있다. 수도권 전철, 비전철 구간의 지중 케이블인 경우에는 22.9kV 직접접지방식과 6.6kV 비접지방식 모두 규정을 초과하고 있다. 따라서 지중 케이블을 이용하는 경우에는 한계거리를 명시하거나 리액터 등의 보상설비 등의 대책이 요구된다.

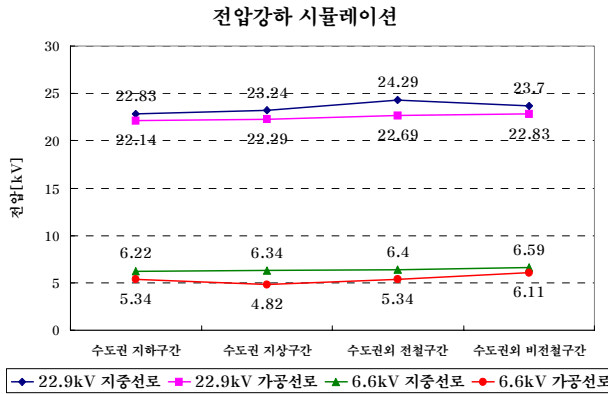


그림 1. 전압강하 시뮬레이션

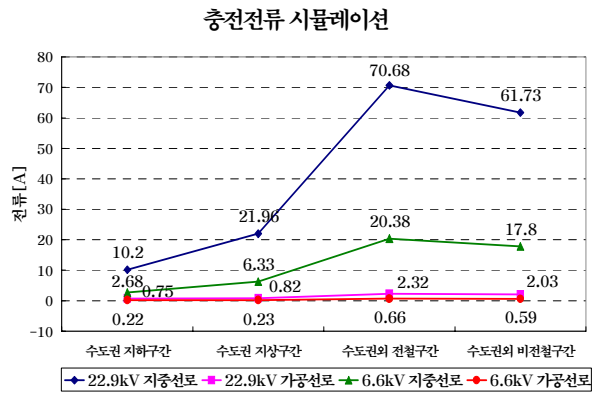


그림 2. 충전전류 시뮬레이션

표 3과 4는 22.9kV 직접접지계통과 6.6kV 비접지계통에서 발생하는 지락고장과 단락고장시에 변전소에서 계측되는 상전압과 상전류 값을 나타내었다. 시뮬레이션은 수도권 지하구간 지중선로 계통을 대상으로 하였으며, 지락고장은 A상 1선 지락고장이며, 단락고장은 A상, B상 단락고장이며, 배전선로 50%지점에서 고장이 발생한 결과를 나타낸 것이다[6,7].

표 2. 1선지락고장

상	6.6kV비접지		22.9kV직접접지	
	전압 [kV]	전류 [kA]	전압 [kV]	전류 [kA]
A상	0.45	0.13	12.92	2.82
B상	6.17	0.08	13.17	0.02
C상	6.33	0.08	13.24	0.02

표 3. 2선단락고장

상	6.6kV비접지		22.9kV직접접지	
	전압 [kV]	전류 [kA]	전압 [kV]	전류 [kA]
A상	3.50	2.23	13.02	2.27
B상	3.76	2.22	12.87	2.25
C상	4.17	0.06	13.25	0.02

1선지락고장이 발생한 경우에 6.6kV 비접지계통에서는 고장상과 고장이 발생하지 않은 전류 차가 그리 크게 나타나지 않아 과전류 계전방식으로 고장검출에 어려움이 있으며, 건전상의 전압 크기는 정격전압의 $\sqrt{3}$ 배 정도로 상승하였다. 이에 반해 22.9kV 직접접지방식은 고장상의 전류가 매우 커 고장검출이 쉬우며, 건전상의 전압상승도 거의 없었다. 선간 단락고장의 경우에는 6.6kV 비접지계통과 22.9kV 직접접지계통 모두 건전상의 전압상승은 거의 발생하지 않았으며 반면에 고장상의 고장전류는 매우 크게 발생하여 고장을 쉽게 검출할 수 있다. 22.9kV 직접접지계통으로 배전계통을 변경하는 경우 고장검출은 용이하지만 지락전류가 배전선로와 나란히 설치된 약전설비의 접지를 따라 유입될 우려가 있어 약전설비의 과손이나 유도장애 등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 공용접지나 중성점에 저항을 삽입하는 중성점 저항접지 등의 대책이 요구된다.

2.2 철도 고압배전계통간의 연장급전

그림 3은 기존의 운영중인 6.6kV 비접지배전계통과 신설 또는 개량되는 22.9kV 직접접지배전계통의 연계 구간을 나타낸 것이다. 시스템 구성을 보면 배전변전소 A와 배전변전소 B는 기존의 6.6kV 비접지배전계통 구간이며, 배전변전소 A에서는 A역부터 C역 분기점까지 전력을 공급하며, 배전변전소 B에서는 D역부터 F역 분기점까지 전력을 1회선으로 공급하고 있다. 배전변전소 C와 배전변전소 D는 22.9kV 직접접지배전계통 구간으로 수전변전소 C는 G역부터 I역 분기점까지 담당하며, 수전변전소 D는 J역부터의 상용 및 예비회선으로 구성된 2회선으로 전력 공급을 담당하고 있다. 그림 3에서 6.6kV 비접지배전계통의 배전변전소 B의 수전점에 고장으로 D역, E역 F역에 전력을 공급할 수 없는 경우에는 배전변전소 A로부터 연장급전을 받아야 한다. 하지만 부하설비가 증가한 경우에는 연장급전시에 전압강하나 용량부족으로 인해 전력공급이 원활하지 못할 수 있어 이러한 경우를 대비하여 인접한 22.9kV 직접접지배전계통에서 연장급전을 해야만 한다.

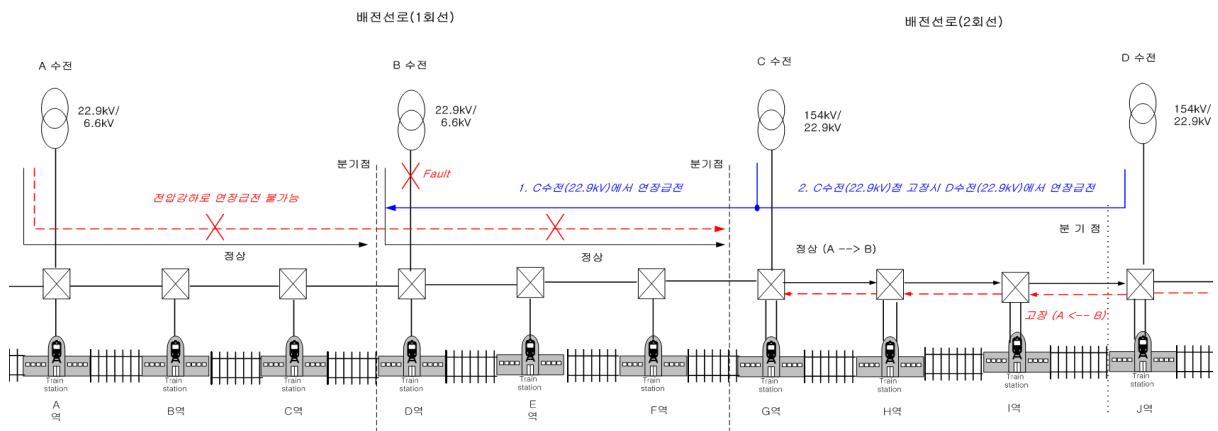


그림 3. 연장급전 배전계통

반면에 22.9kV 직접접지배전계통의 배전변전소 C의 수전점에서 고장이 발생하여 전력공급이 불가능한 경우에는 배전변전소 D로부터 연장급전을 받을 수 있기 때문에 6.6kV 비접지배전계통에서 22.9kV 직접접지배전계통으로 연장급전을 고려하지 않아도 된다.

2.3 연장급전 시뮬레이션에 의한 전기적 특성 분석

연장급전에 따른 여러 전기적인 현상을 파악하고자 그림 4와 같이 기존의 수도권의 전철구간 6.6kV 비접지 가공선로 구간에 22.9kV 직접접지 지중선로가 가선되어 연장급전이 수행된다고 가정하여 전압강하, 충전전류 그리고 고장발생시의 여러 현상을 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 수행하였다.

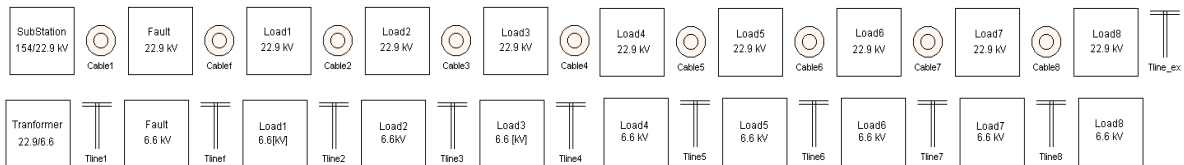


그림 4. 연장급전 시뮬레이션 계통도

표 4는 연장급전시의 22.9kV 직접접지배전계통의 변전소 및 연장급전을 위한 강압용 변압기 1차측과 6.6kV 비접지배전계통의 연장용 변압기 2차측과 연장급전말단에서 나타난 전압강하와 충전전류 특성을 나타낸 것이다.

표 4. 연장급전시의 전압강하 및 충전전류

구분 \ 계측지점	22.9kV 직접접지계통		6.6kV 비접지계통	
	변전소	연장급전 변압기 1차측	연장급전 변압기 2차측	연장급전 말단
선간전압[V]	22.95	23.96	6.92	5.57
전압강하율[%]	-4.4%		-19.5%	
충전전류[A]	70.49		-3.1A	

연장급전의 경우에 전압강하를 살펴보면 22.9kV 배전선로에서는 지중선로의 정전용량 영향으로 인해 전압이 오히려 1.01kV 상승하였으며, 6.6kV 배전선로의 경우에는 1.35kV(19.50%)의 전압강하가 발생하였다. 6.6kV 배전선로의 전압강하율은 기준치에 비교해 볼 때 매우 심각하다고 판단될 수 있지만 단독수전의 경우에도 1.27kV(19.21%)의 전압강하가 발생한 것과 비교해 볼 때 6.6kV 비접지 구간에서 최대부하로 운전하는 있는 경우에는 연장급전과 무관하게 전압강하가 발생하기 때문에 이 구간에는 부하증가에 따른 전압강하 대책이 절실히 요구된다. 연장급전의 경우에 충전전류의 크기는 배전계통의 배전전압, 정전용량, 그리고 선로의 길이에 의해 결정되기 때문에 단독수전과 연장급전시의 차이는 거의 발생하지 않았다. 즉, 22.9kV 직접접지구간에서는 지중선로로 되어 있어 기준값을 초과하고 있지만 이러한 특성은 연장급전과는 무관하다. 다만 연장급전을 수행되는 6.6kV 비접지 배전선로 구간이 케이블인 지중선로로 구성되어 있다면 변전소에서 흐르는 충전전류가 증가할 것으로 예측되나 가공선로인 경우에는 크게 변화하지 않음을 알 수 있다.

연장급전시에 가장 중요한 사항 중 하나는 연장급전 중에 발생하는 고장으로 인해 다른 접지계통으로 고장이 과급되지 않아야 하며 또한 계전기의 오동작으로 인해 전력공급의 중단도 방지하여야 한다. 표 5와 6은 역당 최대부하로 연장급전하는 경우에 22.9kV 직접접지계통과 6.6kV 비접지계통에서 발생한 고장에 대해 배전변전소, 연장급전용 변압기 1, 2차측 그리고 연장급전 말단의 상전압과 상전류의 크기를 나타낸 것이다. 고장전류의 최대 크기를 비교하기 위해 고장발생은 배전변전소 근단인 전체 선로길이 10[%] 지점에서 발생하도록 하였다.

표 5. 22.9kV 배전선로 1선 지락고장(A상)

접지방식 \ 전압, 전류	22.9kV 직접접지계통		6.6kV 비접지계통		
	변전소	연장급전 변압기 1차측	연장급전 변압기 2차측	연장급전 말단	
전압 [kV]	A상	12.90	7.61	2.69	2.10
	B상	13.16	12.36	2.59	2.13
	C상	13.26	13.10	4.24	3.48
전류 [A]	A상	3210.16	95.57	17.46	2.21
	B상	38.51	102.65	13.33	1.74
	C상	128.76	101.06	21.90	2.84

표 6. 6.6kV 배전선로 1선 지락고장(A상)

접지방식 \ 전압, 전류	22.9kV 직접접지계통		6.6kV 비접지계통		
	변전소	연장급전 변압기 1차측	연장급전 변압기 2차측	연장급전 말단	
전압 [kV]	A상	13.26	13.71	0.32	1.06
	B상	13.26	13.85	6.58	4.38
	C상	13.26	13.71	6.56	4.75
전류 [A]	A상	70.27	13.54	50.62	1.11
	B상	79.78	7.37	30.03	3.56
	C상	75.56	14.61	31.84	3.87

22.9kV 직접접지 배전선로에서 1선(A상) 지락고장이 발생한 경우에는 A상 고장전류가 최대 3210.16A까지 증가되어 지락고장이 쉽게 검출할 수 있으며, 22.9kV 배전선로에서 고장이 발생하면 이로 인해 6.6kV 비접지 배전계통에 영향이 있으나, 전압상승이나 고장전류가 커지지 않아 6.6kV 비접지 배전계통 설비에는 피해를 주지 않을 것이다. 다만 22.9kV 배전계통의 차단으로 인해 연장급전은 불가능해진다. 연장급전 중에 6.6kV 비접지 배전선로에서 1선 지락고장이 발생하는

경우에는 6.6kV 비접지 계통이 단독운전하는 경우와 유사한 현상이 발생한다. 즉, 고장상의 전압은 거의 없으지는 반면에 건전상의 전압은 정상시에 거의 $\sqrt{3}$ 배로 상승하는데 반해 고장상의 고장전류의 크기도 정상상태에 비해 크게 증가하지 않았다. 따라서 과전류 계전방식으로는 고장을 검출하기에는 어려움이 있어 영상전류를 이용한 선택접지계전기를 이용하여 지락고장을 검출해야 한다.

전반적으로 6.6kV 비접지 계통에서의 지락, 단락고장으로 인해 22.9kV 직접접지계통에는 그리 크게 영향을 미치지 않아 고장 발생시 고장검출을 신속하게 하여 고장선로를 차단할 수 있다면 기존의 비접지 계통의 보호설비만으로 안전한 연장급전을 수행할 수 있다. 하지만 비접지계통의 지락 고장 검출을 위해 설치된 선택접지계전기의 동작원리가 각 상전류의 합인 영상전류를 이용하여 동작되므로 연장급전 중에 심각한 부하불평형이나 케이블 충전전류의 불평형이 발생하는 경우에는 영상전류로 인해 선택접지계전기의 오동작이 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 정상상태에서도 연장급전이 불가능해지므로 부하 불평형으로 인한 오동작을 방지하기 위해서 동작치를 높여 정정해야 하는데, 계전기의 정정값이 너무 높아지면 비접지 계통에서의 지락고장 검출이 어려워져 고장상황이 지속되고 이로 인해 22.9kV 직접접지계통으로 고장 파급이 우려된다.

따라서 신뢰성있는 고장검출을 위해서는 연장급전을 위한 강압용 변압기의 2차측이 Δ 결선으로 6.6kV 구간이 비접지 계통으로 구성되는 경우에는 접지면압기를 이용하여 비접지 방식을 접지방식을 변경하거나 강압용 변압기의 2차측을 Y결선으로 하여 중성점을 접지시키는 방법도 있다. 다만 고장검출에 용이한 크기로 지락고장 전류의 크기를 적절하게 제어하기 위해서 중성점과 접지사이에 일정크기의 저항을 삽입시켜 고장전류의 크기를 제어할 수 있도록 해야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 6.6kV 비접지배전계통과 신설 또는 개량되는 22.9kV 직접접지배전계통 간에 연장급전을 위한 전기적 특성분석과 안정적인 연장급전 방안을 제시하였다. 이를 위해 전력계통 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수도권내 지하, 지상구간, 수도권외 전철, 비전철구간에 대해 6.6[kV] 비접지방식과 22.9[kV] 직접접지방식을 모델링하였으며, 시뮬레이션을 통해 전압강하, 충전전류 및 고장현상 등의 전기적인 현상을 분석하였다. 또한 수도권외 전철구간에 대해 기존의 6.6[kV] 비접지방식의 가공선로구간과 22.9[kV] 직접접지방식의 지중선로 구간의 연장급전 조건을 제시하였으며, 연장급전 운영시의 전압강하와 충전전류를 분석하였다. 또한 연장급전 운영중에 비접지 구간과 직접접지구간에서 발생한 지락고장으로 인해 각 배전계통에서의 고장현상을 분석하였으며, 이를 바탕으로 안정적인 연장급전 방안을 제시하였다.

향후에는 연장급전을 위한 각종 설비 및 안정적인 보호를 위한 계전기 정정방안에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2001년), “철도 배전계통 시설기준 연구”, 철도청
2. 한국전력공사(1995년), “배전보호기술서”, 한국전력공사 배전처
3. 한국철도기술연구원(2004년), “고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선 전철화 사업 기술자문(3단계)(전력분야)”, 철도청
4. 한국철도기술연구원(2002년), “전철·전력시설물 보호계통 최적화 및 진단기법 개발”, 철도청
5. HVDC Research Center(2003), “PSCAD ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS USER'S GUIDE”
6. 정호성 외 3인(2004년), “웨이브렛 변환을 이용한 철도 고압배전선로의 고장검출기법”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
7. 유상봉 외 8인(2002년), “보호계전 시스템의 실무 활용기술”, 기다리