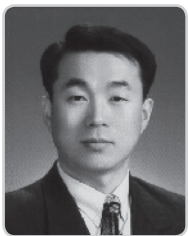


순간정전 및 전압강하에 의한 피해사례와 대책



이근준
충북도립대학 전기에너지시스템과 교수

1. 개 황

현대 문명은 디지털 정밀산업을 근간으로 한다. 컴퓨터, 반도체, 정보통신, 석유화학 등의 현대 산업은 고품질의 전력이 뒷받침되지 않고서는 산업경쟁력을 확보할 수 없다. 우리나라의 산업이 세계적인 생산 경쟁력을 갖추게 된 이면에는 높은 수준의 전력품질이 뒷받침한 바가 크다. 대부분의 생산시설이 PLC(Programmable Logic Controller)나 전자접촉기에 의해 자동화되어 있고, 생활의 모든 영역(교통, 통신, 병원, 주거 등 사회 전반)이 전기를 기반으로 하여 상호 유기적으로 작동되고 있는 상황에서 전력품질/신뢰도의 저하에 의해 한 부분에서 발생한 문제는 적게는 아파트의 엘리베이터나 생산라인 일부를

정지시키기도 하며, 크게는 전 공정, 나아가 한 사회 전체를 마비시키기도 하는 것이다.

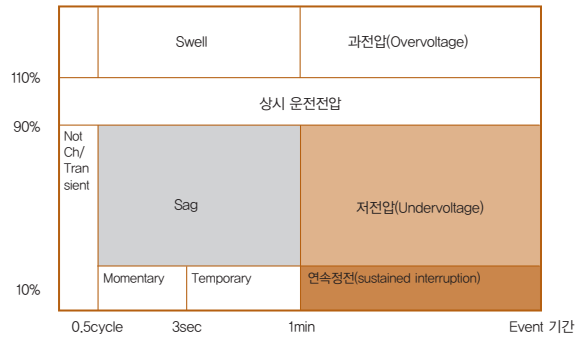
이처럼 중대한 사회적 영향력을 갖는 전력품질 (Power Quality)은 보통 전압품질(Voltage Quality)로 대변된다. 전압품질이 영향을 주는 주된 영역을 분류해보면, 공급전압의 변동, 전압의 신속한 변동, 플리커, 순간전압강하(Dip 또는 Sag) 또는 순간전압 상승(Swell), 과도 과전압, 전압불평형, 고조파 등이 있다. 이 중 순간정전과 순간전압강하는 전력품질의 주된 문제를 제기하는 분야로서, 수용가에 공급되는 전압이 아주 짧은 시간 동안 공급정지 상태에 이르거나(순간정전) 규정전압 이하로 저하되는 상태(순간전압강하)를 말한다.

이와 같은 전압의 이상 상태는 전기사용기기의 민감성에 따라 영향이 다르지만, 민감한 제어영역을 갖는 디지털 정밀 프로세스 산업에 큰 영향을 준다.

2. 현황

가. 정의

순간정전과 순간전압강하에 대한 정의는 국가와 기관에 따라 다르다. 이 중 가장 널리 통용되는 미국의 IEEE 1159 기준을 [그림 1]에 소개한다. 이 기준



[그림 1] 전압 현상의 구분 (IEEE 1159)

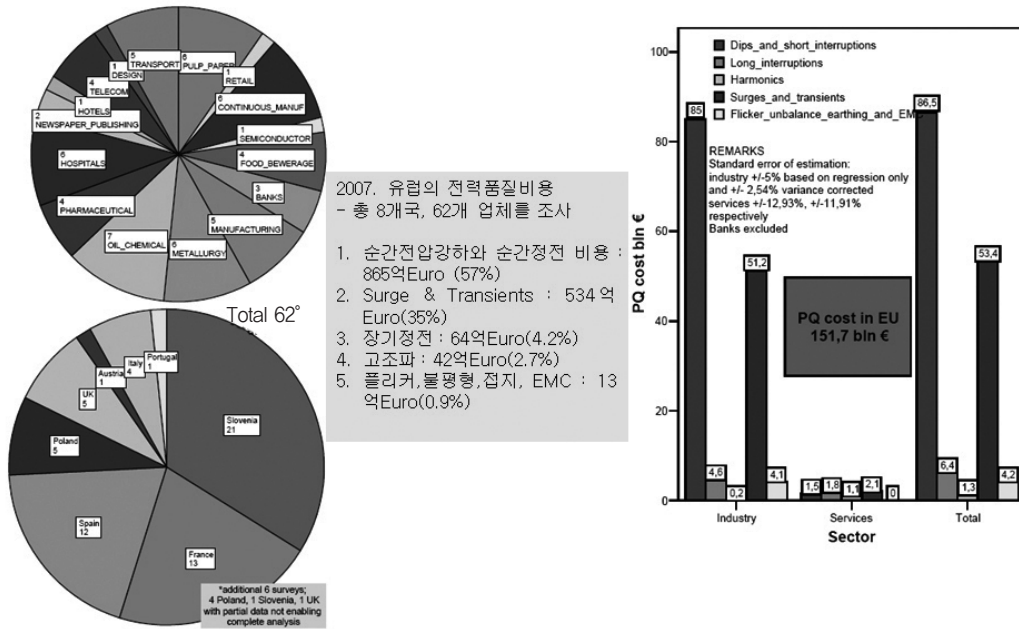
에 따르면 순간전압강하는 90~10% 사이의 전압강하가 0.5cycle~1분 이내로 지속되는 상태를 의미하며(유럽의 EN50160도 동일), 순간정전은 전압 잔류치가 기준전압의 10% 이하로 저하된 상태로 지속시간이 1분(EN50160은 3분, 한국은 5분) 이내인 것으로 정하고 있다.

나. 피해사례

순간정전 및 순간전압강하에 대한 통계적 자료는 국내외적으로 흔하지 않다. 이는 현재 전력회사가 관여하는 요금과 전력서비스의 제도에 순간전압강하 및 순간정전이 미치는 영향이 제대로 측정, 평가되지 않고 있기 때문이다.

[표 1] 유럽의 품질비용 보상

국가명	품질 요인	보상비용(유러달러/년)	비고
노르웨이 (2002)	공급전압변동	5,375~17,875/산업체	7개 프로세스산업
	과도과전압	3,125/산업체	8개 프로세스산업
	공급전압의 Sag	21.3M~41.3M	최종 수요자들
	순시차단	47.5M~66.3M	최종 수요자들
스웨덴(2003)	순시차단 및 전압 Sag	105M~157M	산업체대상
프랑스	중·저전압 수용가에 대해 피해보상	2003년 : 35M(48만건) 2004년 : 37M(40만건) 2005년 : 26M(38만건)	실제 품질비용 지불
이태리(2004)	Dip과 차단		256 산업체



[그림 2] 유럽의 순간정전/순간전압강하(19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21~24 May 2007)

1) 해외

해외에서는 1990년대 이후 전력산업 구조개혁이 진행되면서 정전에 대한 피해의 측정과 보상에 대한 요구가 현실화되었다. 이에 노르웨이, 스웨덴, 프랑스 등의 국가를 선두로 순시차단 및 순간전압강하에 대한 비용을 보상하기 시작하였다.

[그림 2]는 2007년 유럽 8개국, 62개 산업에 대한 전력품질저하에 따른 비용을 나타낸 것으로 총 비용 1,517억 유로의 57%(865억 EURO)가 순간정전과 순간전압강하에 의해 발생한 것으로 보고되었다.

2) 국내

우리나라의 순간정전 및 순시전압강하에 의한 피해사례에 대해 전력회사나 정부에서 통계적으로 공식 발표한 자료는 없다. 2013년 11월 19일 한전이 발표한 보도자료에서 최근 3년간 순간전압강하는 전국적으로 1,500건이 발생했다고 소개하였을 뿐이며, 국가에서도 2011년 여수산단 정전을 계기로 국가산업단지에 대한 최근 5년간의 영구정전통계를 제시하였을 뿐이다(표 2 참조).

2000년대에 접어들면서 우리나라의 전력설비들은 1970년대 후반부터 본격적으로 신설된 송변전설비

[표 2] 국가산업단지 계통정전 발생 현황(2006~2010년)

구분	여수산단	울산산단	포항산단	구미산단	광양산단	기타	계
고장건수	11	10	6	3	3	5	38
면적	31,711천㎡	45,588천㎡	37,869천㎡	25,084천㎡	96,736천㎡	-	-
업체수	223개 (석유화학 129, 기계 82 등)	508개 (석유화학 137, 기계 229 등)	68개 (석유화학 16, 철강 37 등)	981개 (기계 444, 전자 397 등)	51개 (기계 26, 철강 13 등)	-	-

[표 3] 국가산업단지 계통정전 발생 원인(2006~2010년)

구분	한전설비고장	외부 요인			계
		수용가 설비고장	크레인 등 외물접촉	자연현상(낙뢰 등)	
고장 건수	2	17	16	3	38

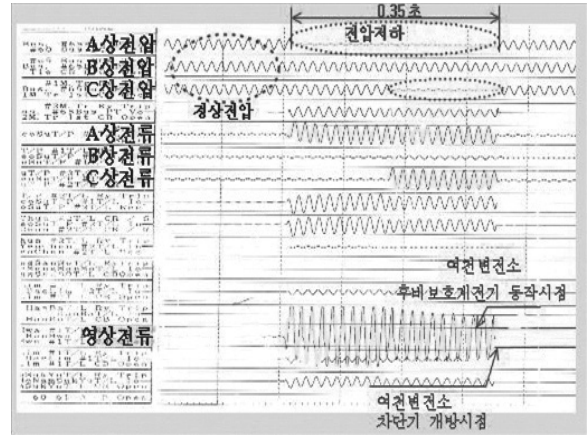
및 산업전력설비들이 교체주기에 도달함에 따라 정전 사고 요인이 증가하게 되었으며, 여기에 FACTS, HVDC 등과 같은 고도의 제어능력을 갖춘 전력설비가 병입하게 되자, 시스템 정합 및 운용능력 미숙에 따른 정전요인도 증가하게 되었다. [표 4]에서는 2006년~2011년간의 대표적인 정전사례를 나타내었다.

[표 4] 우리나라의 대표적인 정전사례(2006~2011)

발생시기	장소 및 피해	정 전 원 인
2006.3.10	서면변전소 (정전 2만호)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가스절연개폐기(GIS) 고장(1981년 제품, 효성) ○ GIS 내부고장 사전진단 및 고장개소를 탐색할 수 있는 장치가 없어 정전 복구에 장시간 소요(70분)
2006.3.24	서산변전소 (정전2만9천호, 화학공장 2곳 가동중단)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 조류배설물 접촉에 의한 송전선로 고장 ○ 고장 송전선로를 차단하는 GIS(1987년 제품, 효성) 동작 지연
2006.4.1	제주연계선 (제주 전역 정전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연계선 손상, 연계선 부속설비 중 하나인 차단스위치 고장, 제주 내연발 전기 제어시스템 오류 ○ 첨단 디지털설비에 대한 운용능력 부족 ○ 정전복구 과정에서 급전지시 오해와 급전전화·일반전화의 공용사용 등으로 복구시간 다소 지연
2006.4.7	여수화력 (화학공장 3곳 가동중단)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 작업사다리(알루미늄)가 고전압전선에 근접, 地落 ○ 안전수칙 미준수, 안전교육 및 훈련 미흡 ○ 보호차단기 작동 오류(2개 동시 차단)
2006.5.31 13:37(2초간)	여수산단 (GS칼텍스 등 3개 공장)	○ 순간정전
2007.8.3 14:00	삼성전자 K2지역 변전소 (6개생산라인 중단)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배전반 문제로 발생, ○ 정전 9시간만에 전라인 전력공급 ○ 피해액 : 250~500억 원 추정
2010.3.24	삼성전자 기흥공장 (NAND 14개 라인)	○ 1~2시간 전원공급 중단
2010.10.5 14:58~15:12	삼성전자 기흥공장 K1 지역 (5개 생산라인, LED 3개 라인, 보조 1개 라인 중단)	<ul style="list-style-type: none"> ○ UPS에 의한 중요설비 즉시 재공급 ○ 14분간 정전
2008.05.03	여수산단 수용가내 변전소 (22개 수용가 정전발생)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수용가 154kV 모선 피뢰기 지락, 수용가 모선보호계전기 분리운전으로 모선차단 실패 ○ 0.35초 동안 순간전압강하 발생 ○ 발전기 25만kW×17기 트립
2011.01.17 16:09	여수산단 (GS칼텍스 외 25개 업체 정전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 여수화력 변전소 구내 154kV 종단접속함 결함 ○ 수용가 보호계전기 오동작 ○ 3개 수용가 영구정전 ○ 23개 수용가 순간전압강하로 인한 피해 발생 ○ 총 피해액 707억 원(영구 : 521억 원, 순간 : 186억 원)
2011.12.06 13:59~	울산산단 용연변전소 전체 (SK에너지 외 456개 사업장 정전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 변전소내 GIS 내부 Spacer 표면 절연파괴(재사용품)로 인한 고장 파급 ○ 12~41분 만에 복구 ○ 피해액 332억 원



[그림 4] 여수산단 수용가 피뢰기사고



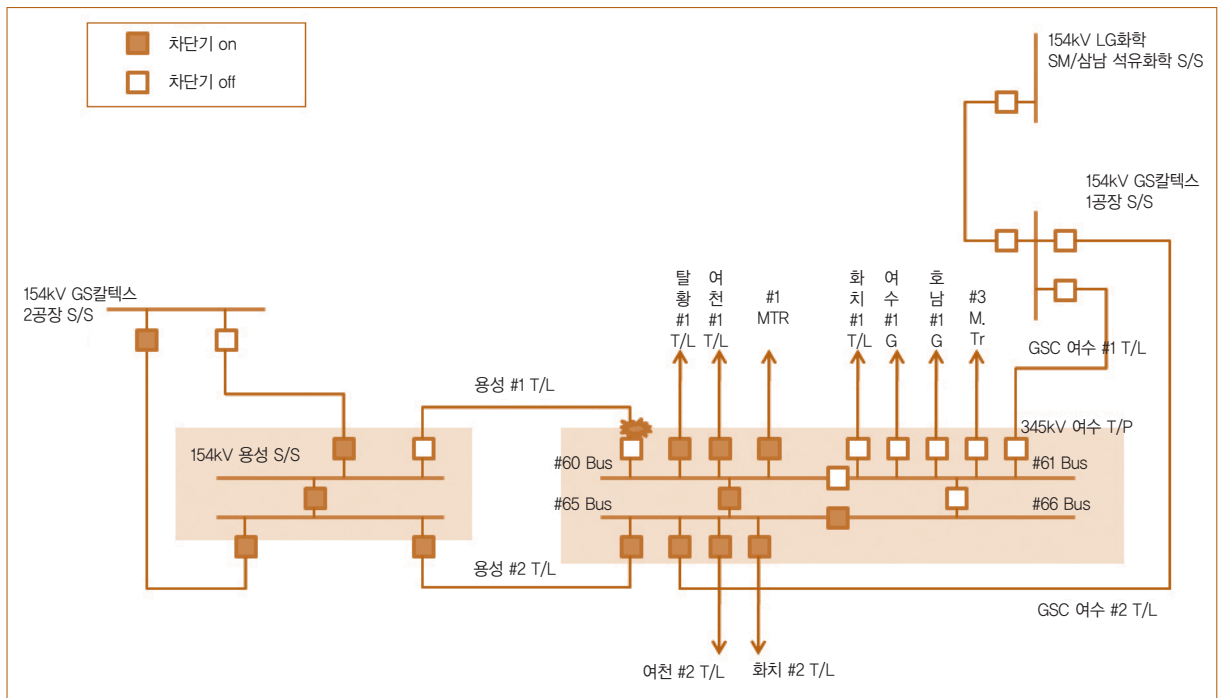
[그림 5] 여수산단 2008년 5월 3일 순간정전

하로 인해 한화석유화학, 대림산업, 여천 NCC 2,3공정, 폴리미래 등 화학공장 5곳을 포함한 22개 수용가 약 44만kW가 정전이 되었으며, 25만kW 발전기 1대가 트립되었다. 피해공장들은 정전 직후 예비전력을 공급받았다. 또한, 이와 동시에 고장점 인근에 위치한 타 송전선로를 사용하는 수용전력 66MW인 수용

가의 지락과전류 계전기가 오동작하여 주변압기를 트립시킴으로써 정전이 확대되었다.

라) 2011년 1월 17일

2011년 11월 17일 16시 09분, 여수화력 변전소 구내 154kV 중단접속함(EB-G, Ending Box-Gas)



[그림 6] 여수산단 정전계통도(영구정전은 GS칼텍스 1공장/S 이후, 기타 순간전압강하)

[표 5] 여수산단 사고 발생과 진전 내역

시각		사건	보호계전기	비고	자료
월일	시각				
2011년 1월 17일	16:09	한전 154kV 여수화력구내 S/S 154kV 용성#1T/L CB 637 Trip		1. C상 지락(1cycle) → 3상 단락(3cycle) 진전, 차단 2. 순간저전압 발생 가) 사고지점 30km 이격처 : 0.4 pu 나) GS 칼텍스 구내 : 0.01~0.02 pu (여수T/P 변전소에서 3.5km) 3. 거리계전기 입력전압 : 0.98~0.57 V (정상동작전압 : 10~208V)	(한전)
	상동	- 154kV GS칼텍스 1공장 #2 수전 CB Trip - 154kV GS 칼텍스 2 공장 #1 수전 CB Trip	거리계전기 (GE제) (Z-1 C상) trip		(GS 칼텍스)
	0.6초 이후	여수T/PS/S 154kV 용성 #1 T/L CB 637 재폐로 투입			
	상동	호남T/P #1 G Step-up Tr. Trip	부흐홀스 계전기	1. 발전출력 : 240MW(890A) 2. 고장시 '웅~' 소리발생 3. 고장전류 : 6000[A] 공급	호남T/P
	0.1초 이후	여수T/P S/S #61 모선 무압	#61 모선보호 계전기 (Toshiba제)	1. 여수 #1G Trip 2. GS 칼텍스1공장 #1T/L trip(1공장 및 LG화학 SM, 삼남석유화학 영구정전)	

에서의 결함으로 인하여 지락 및 단락 사고가 발생하였다. 1차적으로 관련 보호계전기가 동작하여 해당 고장선로를 제거하였으나 이 과정에서 일부 수용가의 보호계전기가 오동작하여 전력 안정공급을 위해 설치된 일부 선로(GS 칼텍스 1, 2공장측 선로 각 1개소)를 차단(영구정전 미발생)하였다. 2차적으로 송전선로 자동 재폐로가 진행되었으며, 이러한 과정 중 순간전압저하/순간정전에 따른 수용가 전력설비 제어장치들의 민감한 동작으로 인해 23개의 산단 수용가에 순간정전의 피해가 발생하였고, 여수화력 변전소의 모선보호계전기가 부적절하게 동작하여 2회선 수전을 받는 GS칼텍스 1공장의 잔여선로를 차단하면서 영구정전이 발생, 3개의 중요 수용가들에게 영구정전이 발생하였다.

다. 원인

1) 전원 측의 원인 제공

순간정전과 순간전압강하를 발생시키는 1차적 원

인은 자연적인 낙뢰로 인한 지락, 기기의 시공불량 및 노후화에 따른 지락 또는 단락이다. 그러나 이 원인에 의해 산업용 수용가가 받는 순간정전 및 순간전압강하의 심각도는 해당 고장점의 전원임피던스(Z_{sf} [pu])와 고장임피던스(Z_g [pu]) 및 수용가의 전원측 임피던스(Z_{cs} [pu])에 따라 다르게 된다.

만약 고장점이 수용가와 동일전력전송경로의 후단에 있을 때, 수용가의 전압은 다음과 같이 계산될 수 있다.

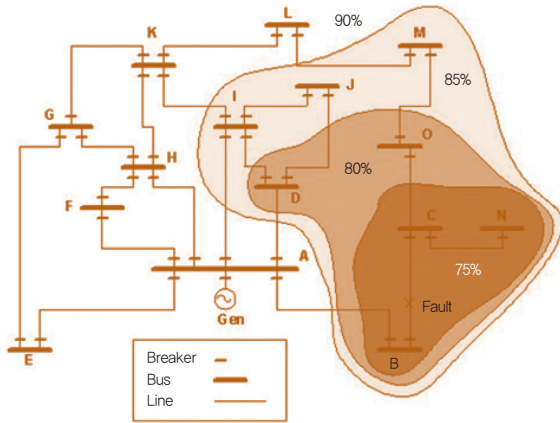
$$- \text{3상 단락사고 시 : } V_{sag} = \left(1 - \frac{Z_{cs}}{Z_{sf} + Z_g}\right) \dot{V}_s$$

- 1선 지락사고 시 :

$$V_{sag-a} = \left(1 - \frac{Z_{csa}}{Z_{0sf} + Z_{1sf} + Z_{2sf} + 3Z_g}\right) \dot{V}_s$$

2) 수용가 프로세스 제어계의 민감도 영향

순간정전/순간저전압에 의해 수용가들의 피해가 커지는 것은 수용가에 설치된 제어계가 이 현상에

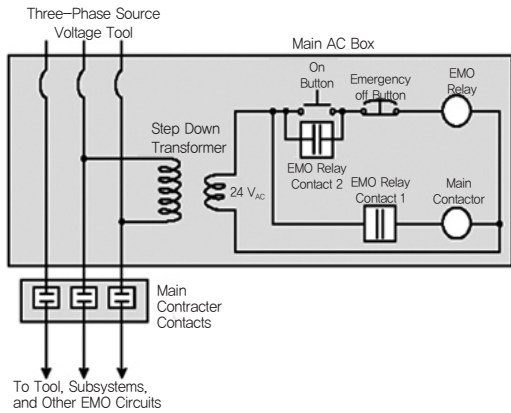


[그림 7] 고장 발생점과 전력망 각 지점의 전압강하

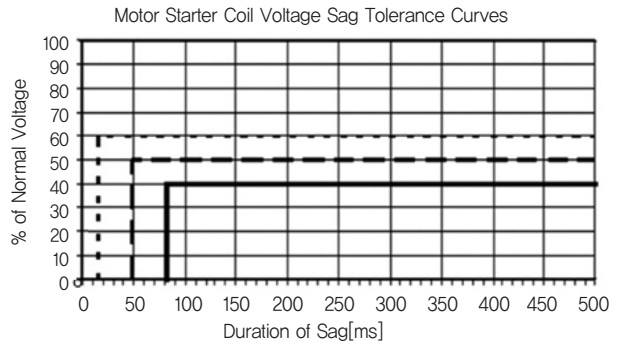
대한 내성이 없기 때문이다. 여수산단의 경우 23개의 업체들에게 직접적인 정전이 아닌, 순간저전압/순간

정전으로 인하여 내부제어설비들이 정지됨으로써 피해가 발생하였다. 1차 고장시(지속시간 : 66ms) 및 재폐로시(지속시간 60~250ms)에 발생한 저전압은 10% 미만으로서 순간정전이였다. 그런데 이로 인한 피해는 반도체산업이나 석유화학단지처럼 정밀 프로세스 산업인 경우 전압 저하에 민감하여 한 공정만 정지하면 전체 공정이 정지하게 된다는 측면에서 실질적인 피해는 더욱 크다. [그림 9]는 이에 산업용 제어설비에서 많이 채용되는 전자접촉기의 순간전압강하내성곡선(CBEMA 곡선)으로 IEEE기준에 의하면 Sag 전압 0.6pu 이하, 15~80ms 정도 이상의 지속시간이면 접촉기가 개방되는 것을 보여준다.

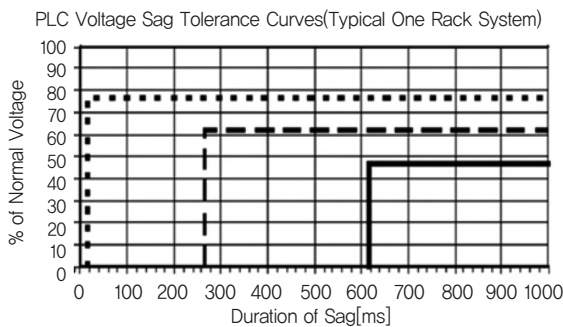
[그림 10]은 산업용 공정제어에서 보편적으로 채



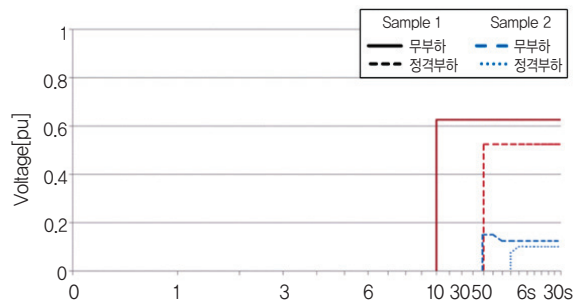
[그림 8] 산업용 시퀀스 제어장치



[그림 9] 전자접촉기의 CBEMA곡선(IEEE)



[그림 10] 산업용PLC의 CBEMA곡선(IEEE)



[그림 11] 우리나라 PLC의 순간전압강하내성곡선

용되는 PLC의 순간전압강하내성곡선(IEEE)이며, [그림 11]은 우리나라에서 생산된 PLC를 시험한 결과이다(전압품질이 저압전기기기운전한계에 미치는 특성연구, 2008.1, 산업자원부). PLC의 경우 순간전압강하에 대한 내성은 미국기준으로는 크기 0.8~0.47pu, 지속시간 30~610ms, 국내설비 시험결과로는 크기 0.62~0.1pu, 지속시간 160ms~1sec 정도로서 해당 순간정전에 제어회로를 개방시킬 수 있다.

라. 대책

[그림 12]는 순간전압강하/순간정전에 대한 문제에 대해 공급자와 수요자를 한 평면 위에서 취급한 것이다. 전력 공급자 측은 고장횟수의 저감 및 고장제거 시간 감소를 통해 시스템의 특성 개선으로 순간전압강하의 임팩트를 일정 범위 이내로 향상시킬 수 있는 대안을 제시하게 되며, 설비측면에서는 내성을 갖출 수 있도록 장치의 설계를 향상시킬 것이다. 양쪽의 비용이 상대적으로 클 경우 공동으로 협력하여 전압 특성을 향상시킬 수 있는 장치들(SVC, UPS 등)을 설치하는 것을 고려하게 될 것이다.

1) 전원 측 대책

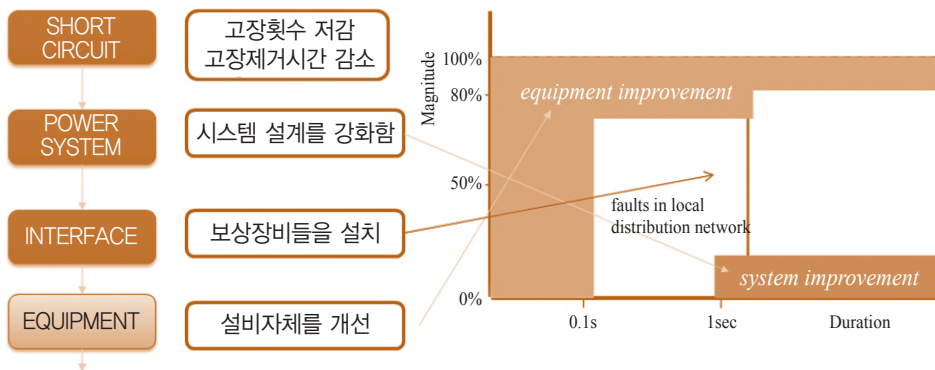
[그림 13]은 전원 측 대책으로서 전력망에 설치하는

STATCOM 및 DVR의 기능을 보여준다. 전원 측 대책은 영향범위가 크고, 따라서 기기용량이 크게 되기 때문에 특수한 지역의 전압서비스 요구에 상응하여 설치 특성을 면밀히 검토하여야 한다.

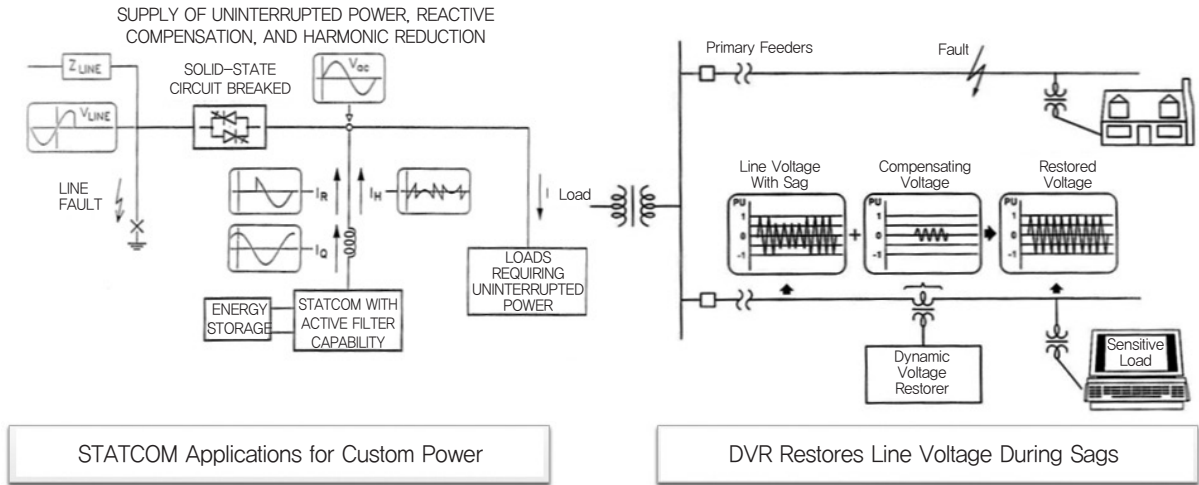
2) 부하 측 대책

순간전압강하/순간정전에 대한 부하 측 대책은 다수의 부하설비에 대한 특성을 고려하여 다음과 같은 계획을 수립할 필요가 있다.

1. 장비 및 부하설비를 분류, 차별화하여 중요부하에 대해서는 UPS를 적용하거나 DC를 공급하고 다음 중요도에는 시지연 타이머, 지연스위치 등을 적용한다.
2. 공정별, 설비별 순간전압 보상전압 및 수준 결정을 위한 기술 표준을 정한다.
3. 각 공정과 생산라인, 설비별로 적용에 대한 우선순위를 결정한다.
4. 무배터리 보상방식을 선정한다.
5. 중앙집중 또는 분산보상방식을 설정한다.
6. 시스템의 각 요소별 순간전압강하 내성을 분석한다.
7. 순간전압관리를 위한 표준화된 시스템을 구성한다.



[그림 12] 순간전압강하/순간정전에 대한 통합적인 접근방법



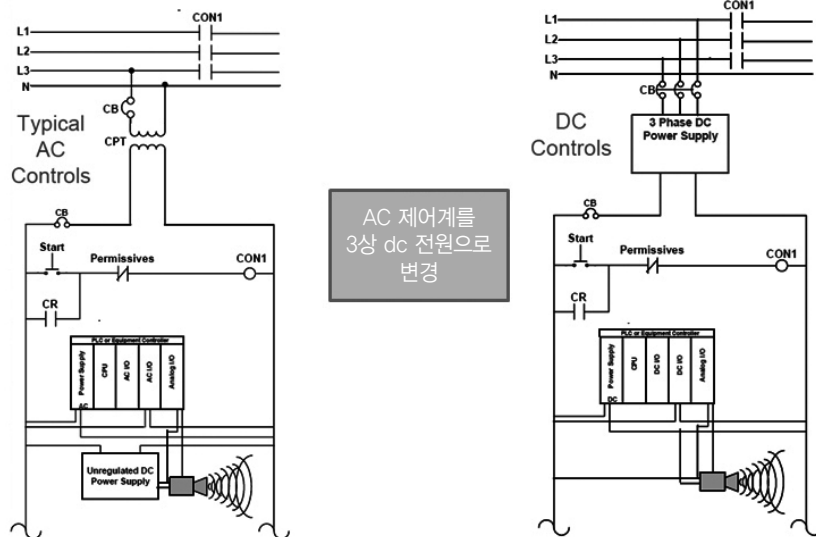
[그림 13] 전원 측 대책(STATCOM과 DVR)

3. 전망

순간전압강하/순간정전의 문제는 우리 사회가 디지털화, 첨단화, 자동화가 진전될수록 더 큰 영향을 끼치게 되는 문제이며, 전력품질 현상이 미치는 사회적 비용 측면에서도 심각한 문제이다. 더구나 현재는 전력발전단계에서 전력망에 도입한 기기들의 수명주

기가 도래한 시점으로 설비의 고장빈도가 증가하는 단계에 진입해 있다. 또 기상이변에 따른 자연재해의 증가 등으로 인해 낙뢰 등 전원 측의 고장요인은 증가하고 있는 상황인 반면, 원자력발전 및 신재생 전원의 비중 증가로 인한 전원의 제어성능은 점진적으로 저하되고 있는 상황이다.


그러나 산업체 측의 정밀전력에 대한 요구는 우리



[그림 14] AC 제어계를 3상 DC 전원으로 변경한 예

나라 산업의 구조적 여건에 따라 앞으로 더욱 강화될 전망이다. 하지만 이에 반해 산업체에서 순간정전/순간전압강하에 대한 이해와 전력설비에 대한 투자는 매우 인색한 상황이다. 중요 국가산단에서의 수차례의 순간정전/순간전압강하에 의한 피해는 이 문제의 심각성을 이미 입증한 바 있으며 향후 관련 피해는 더욱 증가할 것으로 전망된다.

이와 같은 상황에 대처하기 위해서는 순간정전/순간전압강하에 대한 피해 상황과 보상설비에 대해 전력공급자 및 수요자에 대해 충분히 이해시키는 일이

시급하다. 이와 함께 양자 간의 합의를 유도해 내기 위한 사회적 접근, 즉 표준화된 지표와 정당한 기술적/경제적 평가 및 관련 요금제도·기준 등이 제시되어야 할 것이다. 또한, 정부에서는 스마트그리드를 지향하고 있는 입장에서 전력의 가격상승과 전력품질의 대책에 대한 소프트웨어적인 접근이 더욱 필요한 상황 하에서 해당 분야에 대한 정부-제작자-전력회사-소비자 간의 사회적 합의를 유도해 낼 수 있는 기술적·경제적 협력 메커니즘을 개발해 활용하여야 할 것이다. 

[참고문헌]

- [1] 이근준 외 3, “여수산업단지 정전보고” 대한전기학회 전기의 세계, 2011.5, pp. 50~59
- [2] 김도훈, “한국의 산업구조의 변화와 창조 경제”, kiet, 2013.10
- [3] 양정재, “주요정전고장사례”, 2008.9
- [4] “여수산단 보도자료” 지식경제부, 2011.4
- [5] 이근준, “스마트그리드에서의 전력품질 확보방안”, 원전 전력계통전문교육과정, 원자력 안전기술원, 2012
- [6] G. J. Lee, G. T. Heydt, “An interactive – dynamic mechanism conceptualizing the cost and benefit of electric power quality,” Journal of Electric Power Components and Systems, ELSEVIER, EPSR 69(2004) pp.69~75, 2004
- [7] Geun-Joon Lee, “A Power Quality Index Based on Equipment Sensitivity, Cost, and Network Vulnerability”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 3, JULY 2004
- [8] 이현철, 이근준, “순간전압강하에 대한 비선형 저압전기기기의 동적특성”, 대한전기학회 논문지, 57-3-2, pp.336~343, 2008.3