

전력 품질과 동적 순간전압강하 보상기의 적용 (상)

김지홍 · 이상동 · 김명찬
이현원 · 이준엽
현대중공업(주) 기전연구소

1. 서론

최근 산업용 부하에 Computer, PLC, AC Drive, DC Drive 등의 마이크로 프로세서를 기반으로 하는 제어장치의 사용과 외란에 고도로 민감한 전력전자기기의 확산에 따라 전력품질(Power Quality) 문제에 대한 관심이 높아져 가고 있고, 아울러 수용가들의 전력품질에 대한 요구도 커지고 있다.

이에 따라, IEC(1000-2-2/4)와 CENELEC(EN50160) 표준에서는, 전력품질을 수용가 기기를 손상시키지 않고 정상적인 작동을 할 수 있도록 공급되는 전력의 특성으로 규정하였으며, UNIPED는 이 정의에 공급의 가용성(Availability)을 추가하였다.

외란에 민감한 부하를 가지고 있는 수용가의 경우, 일정한 주파수와 크기를 갖는 지속적인 안정된 계통 공급 전압을 필요로 하게 되고, 만일 전압이나 전류, 주파수의 변화로 인해 수용가 기기의 오작동이나 고장이 발생한다면 전력품질의 문제가 존재한다고 할 수 있다. 이러한 전력품질의 문제 중에서 산업용 수용가의 경우, 기기의 재가동이나 생산품의 불량률 증가를 유발하는 순간전압강하(Voltage Sag)가 가장 큰 문제점으로 나타나고 있다. 순간전압강하는 대용량 전동기의 기동이나 인접 계통의 사고에 의해 발생하는 돌입전류에 의해 발생하며, 선로의 상전압 강하, 위상 변화를 일으킨다.

이러한 전력품질 문제에 따른 경제적 피해액은 미국의 경우, 1년간 약 \$26억 정도로 추산되고 있으며, 국내에서는 아직까지 정확한 피해 조사가 이루어지지 않고 있지만 반도체 산업에서만 연간 약 2000억원의 손실이 발생하는 것으로 추정되고 있다. 현재 각국의 많은 수의 전력회사가 계통에 모니터링 시스템을 설치하여 전력품질 수준에 따른 서비스를 실행하고 있으며, 또한 전력품질을 향상시키기 위해 SIEMENS, ABB 등에서는 STS(Static Transfer Switch), DVR(Dynamic Voltage Restorer),

DSTATCOM(Distribution Static Compensator) 등을 개발하여 적용하고 있다.

본고에서는 전력품질의 문제 가운데 산업용 수용가에 큰 손실을 야기하는 순간전압강하의 정의, 순간전압강하의 정도를 평가하는 지수와 적용현황 및 기기에 미치는 영향에 대해 살펴보고, 이러한 순간전압강하를 보상하기 위한 순간전압강하 보상기(DVR)에 대해 살펴보고자 한다.

2. 전력 품질(Power Quality)

IEEE Standard 1159-1995에서는 영구정전(Sustained Interruption)을 1분 이상 지속되는 정격전압에서 10% 이상의 RMS값의 감소로 정의하였다. 영구정전은 고장구간의 모든 수용가가 영향을 받기 때문에, 이러한 영구정전을 평가하기 위해 SAIFI, SAIDI, CAIDI 등의 많은 신뢰도 지수들이 정의되고 사용되어 왔다. 최근 들어 전력의 품질 문제에 대한 관심이 높아지면서, IEEE의 프로젝트 그룹인 P1366은 이에 더해 순간정전과 순간전압강하에 대해 정의하였다.

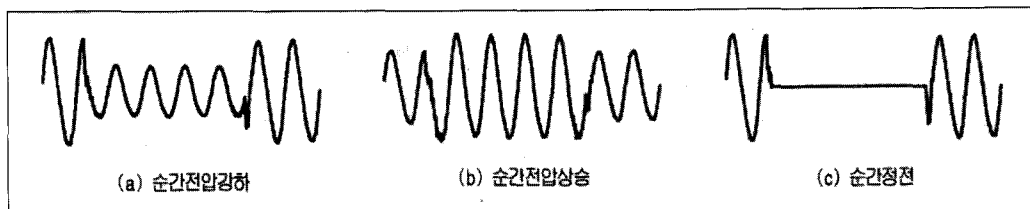
IEEE Standard 1159-1995, "Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality"에서 전압의 RMS값 변동에 대해 정의하고 있다. 이 표준안에서는 순간전압강하(Voltage Sag), 순간전압상승(Voltage Swell),

순간정전(Momentary Interruption), 영구정전(Sustained Interruption)을 그 크기와 지속시간에 따라 표 1과 같이 분류하고 있다. 그림 1에 전력품질에 영향을 주는 전압의 RMS값의 변동 파형을 나타내었다.

순간전압 강하는 전압이 1/2 주기에서 길게는 120초 동안 그 최저허용한도를 벗어나는 것을 의미하며, 인접 급전선에서의 사고나 대용량 부하의 기동시에 발생한다. 반면 순간전압 상승은 이와 반대 개념으로서 부하의 급격한 감소나 중부하의 탈락으로 발생되며, 설비의 전기적 절연을 파괴시키며 나아가 기기의 손실을 가져온다. 순간정전은 계통의 사고시 Recloser에 의한 재폐로와 사고 복구가 이루어질 때까지 수백ms 동안의 순간적인 전력공급 중단을 의미하며, 지속시간은 보호계전 방식에 따라 달라지게 된다.

〈표 1〉 전압 RMS값의 변동(IEEE Std. 1159-1995)

Category		Duration	Voltage Magnitude	
Short Duration Variation	Instantaneous	Sag	0.5~30cycle	0.1~0.9pu
		Swell	0.5~30cycle	1.1~1.8pu
	Momentary	Interruption	0.5cycle~3s	<0.1pu
		Sag	30cycle~3s	0.1~0.9pu
	Temporary	Swell	30cycle~3s	1.1~1.8pu
		Interruption	3s~1min	<0.1pu
Long Duration Variation		Sag	3s~1min	0.1~0.9pu
		Swell	3s~1min	1.1~1.8pu
		Sustained Interruption	>1min	0.0pu
		Undervoltage	>1min	0.8~0.9pu
		Overvoltage	>1min	1.1~1.2pu



〈그림 1〉 전력품질에 영향을 주는 전압 RMS값 변동

3. 순간전압 강하에 대한 민감부하의 특성 곡선

몇몇 제조회사들과 단체들은 다양한 전압의 크기와 지속시간을 갖는 순간전압강하를 일으킬 수 있는 신호발생기(Signal Generator)를 사용하여, 기기의 순간전압강하에 대한 특성에 대해 시험을 수행하였다. 이를 통해 제시된 민감한 기기의 순간전압강하에 대한 특성곡선이 산업용 표준으로 지정되어 사용되고 있다.

가. CBEMA 곡선

ANSI/IEEE Standard 446-1987, "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications"에서는 그림 2와 같은 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturers Association)곡선이 제시되어 있다. 이는 전압의 변동에 민감한 컴퓨터산업의 제조에 적용되었다.

나. ITIC 곡선

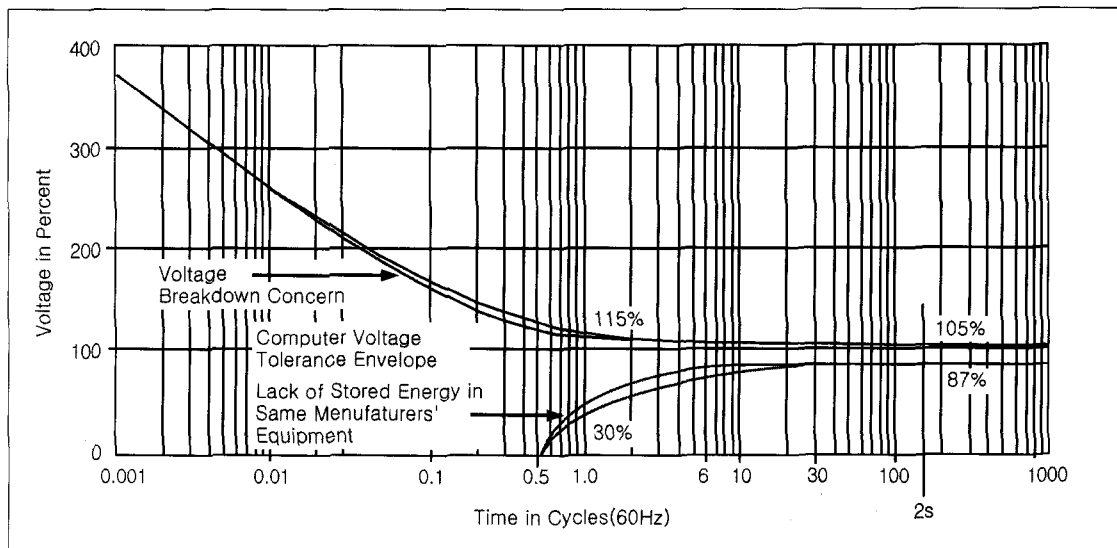
CBEMA의 후신인 ITIC(Information Technology Industry Council)에서는 120V, 240V에서 동작하는 정보 처리 기기들의 단상 Data에 대한 권고 곡선을 제시하였다(그림 3 참조).

다. SEMI 곡선

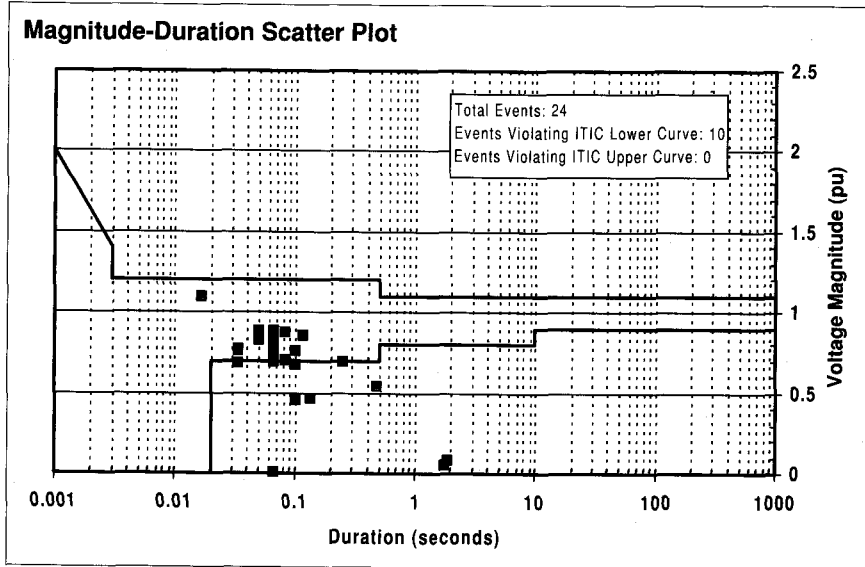
전력품질에 매우 민감한 공정을 가지는 반도체 산업체들의 협회인 SEMI(Semiconductor Equipment and Materials International)에서는 막대한 손실을 가져오는 순간전압강하에 대한 기기들의 민감도와 시험방법을 개발하기 위해서 'Power Quality and Equipment Ride through Task Force'를 구성하고, SEMI 2844 Standard에서 그림 4와 같은 SEMI 곡선을 제시하였다.

라. 특정 수용가 기기의 특성곡선

실제 수용가의 기기들은 제조자나 모델에 따라 표준과 다소 다를 수 있으므로, 더욱 안정성을 보장하기 위해서



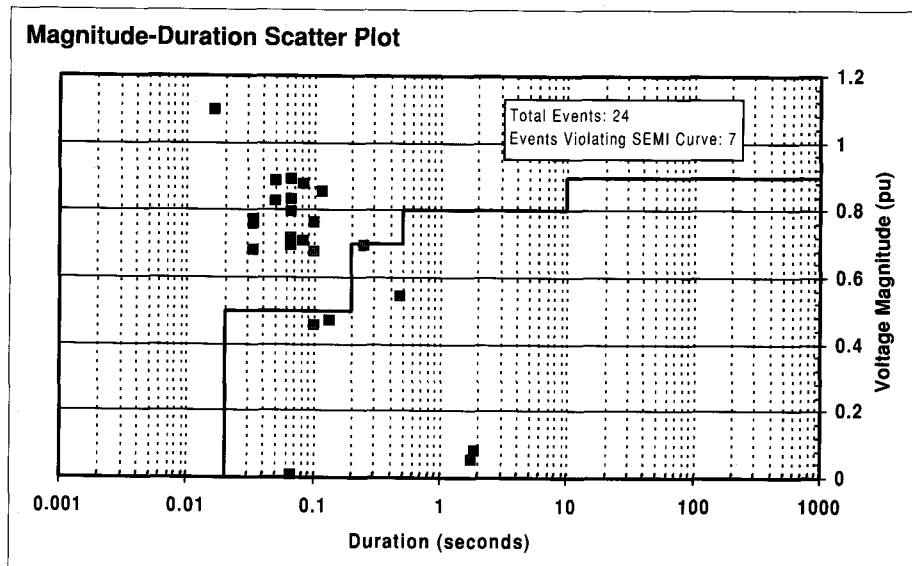
〈그림 2〉 CBEMA Curve
ANSI/IEEE 446 "typical design goals for computer conscious manufacturers"



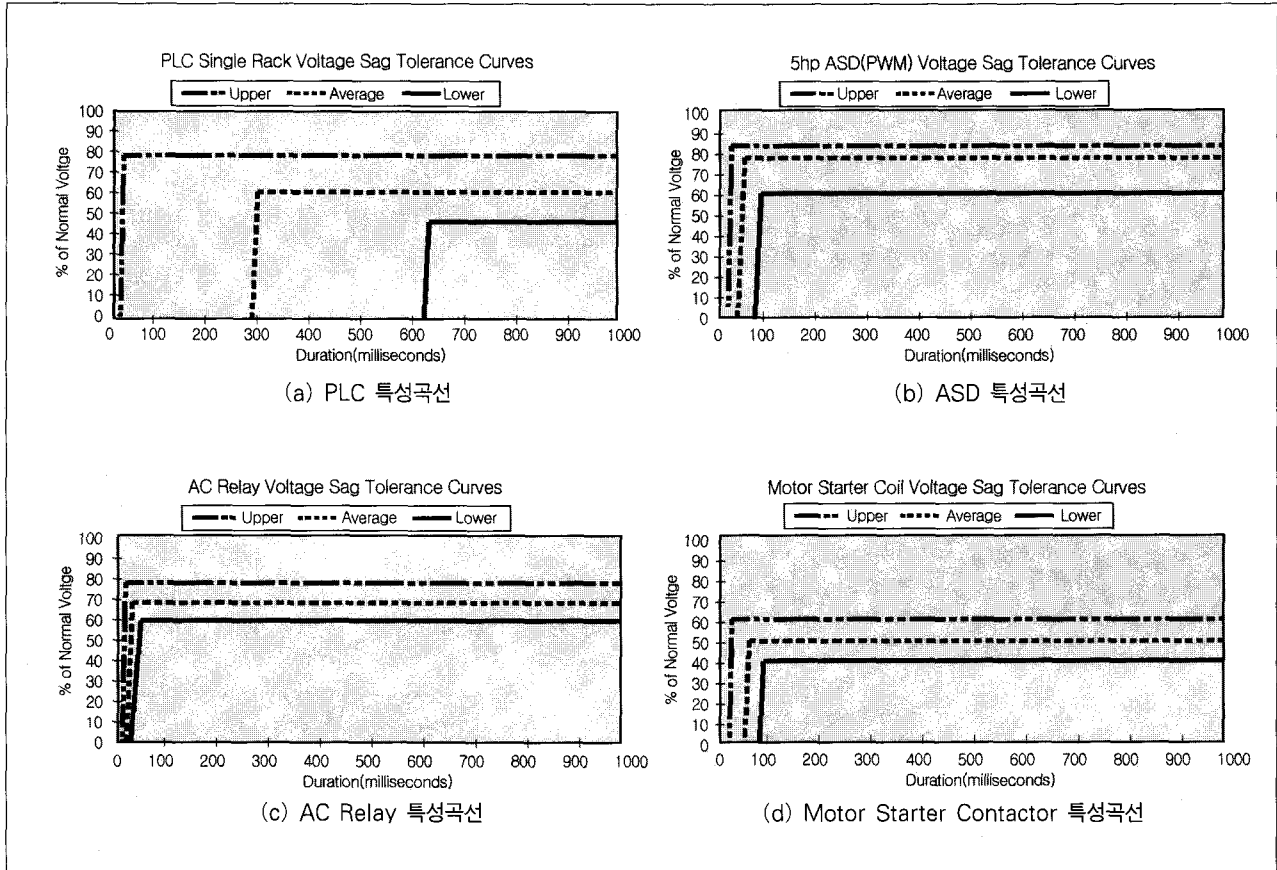
〈그림 3〉 ITIC Curve(단상 120V, 240V의 기기에 적용)

는, 전력품질 모니터링 설비를 통한 순간전압강하에 대한 기기의 특성곡선의 산출이 필요하다. IEEE 1346 'IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic

Process Equipment'에서는 PLC(Programmable Logic Controller), ASD(Adjustable Speed Drive), AC Relay, Motor Starter Contactor 등에 대한 특성곡선을 제시하고 있다(그림 5 참조).



〈그림 4〉 SEMI 2844 Standard Curve



〈그림 5〉 IEEE 1346, 순간전압강하 민감부하의 특성곡선

전압품질과 관련된 표준들은 표 2에 나타나 있다.

4. 순간전압강하 평가지수 및 적용현황

가. 현재 적용되고 있는 순간전압강하 평가지수

순간전압강하를 평가하기 위해서 여러 단체 및 전력회사들은 다년간의 모니터링 및 조사를 실시하고 있다. EPRI는 ELECTROTEK과 공동으로 DPQ (Distribution Power Quality) 프로젝트를 수행하였으며, 유럽의 UNIPEDA DISDIP Group, 캐나다의 CEA(Canadian Electrical Association), 노르웨이의

EFI(Norwegian Electric Power Research Institute), 미국의 NPL(National Power Laboratory) 단체와 Detroit Edison, ESCOM 등의 전력회사들 역시 지속적인 모니터링을 하고 있다. 이들은 순간전압강하를 평가하기 위한 지수로서 SARFI_x, Sag Score, DISDIP Table, Voltage Dip Table 등을 제시하고, 이를 기반으로 한 전력공급 서비스를 실시하고 있다.

나. SARFI_x

미 전력연구원 EPRI에서는 ELECTROTEK과 공동으로 1989년부터 1995년까지 24개 전력회사 100개 배

〈표 2〉 전력품질 관련 표준안

Organization	Std.	Title/Scope
ANSI/IEEE	141	Industrial Electric Power Systems
	142	Industrial & Commercial Power System Grounding
	241	Commercial Electric Power Systems
	242	Industrial & Commercial Power System Protection
	399	Industrial & Commercial Power System Analysis
	446	Industrial & Commercial Power System Emergency Power
	493	Industrial & Commercial Power System Reliability
	518	Control of Noise in Electronic Controls
	519	Harmonics in Power Systems
	602	Industrial & Commercial Power Systems in Health Facilities
	739	Energy Conservation in Industrial Power Systems
	929	Interconnection Practices for Photovoltaic Systems
	1001	Interfacing Dispersed Storage and Generation
	1035	Test Procedures for Interconnecting Static Power Converters
	1050	Grounding of Power Station Instrumentation & Control
ANSI	C62	Guides & Standards on Surge Protection
	C84.1	Voltage Ratings for Power Systems & Equipment
	C37	Guides and Standards for Relaying & Overcurrent Protection
	C57.110	Transformer Derating for Supplying Nonlinear Loads
IEEE	P487	Wire Line Communication Protection in Power Stations
	1100	Powering and Grounding Sensitive Equipment
	P1159	Monitoring and Definition of Electric Power Quality
	P1250	Guide on Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbance
	P1346	Guide on Compatibility for ASDs and Process Controllers
NEMA	UPS	Uninterruptible Power Supply Specification
NFFA	70	National Electric Code
	75	Protection of Electronic Computer Data Processing Equipment
	78	Lightning Protection Code for Buildings
NIST	94	Electric Power for ADP installations
	SP678	Overview of Power Quality and Sensitive Electrical Equipment
UL	1449	Standards for Safety of Transient Voltage Surge Suppressors

전계통의 276개 사이트에 대하여 27개월에 걸쳐 전력품질 상태에 대한 모니터링을 실시하였다. 이 DPQ 프로젝트의 결과로 제출한 보고서 'An Assessment of Distribution System Power Quality(RP 3098-1)'에서 순간전압강하에 대한 계통의 평가지수로 SARFIX (System Average RMS Variation Frequency Index)를 제안하고 있다.

$$SARFI_{\%V} = \frac{N_i}{N_T}$$

여기서, %V는 전압한계를 나타내며 140, 120, 110,

90, 80, 70, 50, 10으로 주어지고, SARFI_X 지수는 총 수용가 수 N_T에 대해, 이를 위반하는 수용가 수 N_i의 비로 주어진다. 단일 사이트의 경우에 SARFI_X 지수는 모니터링 기간 동안에 발생한 순간전압변동에 대하여 한계 전압 %V보다 높아지거나, 낮게 떨어지는 순간전압변동의 평균 횟수를 나타낸다.

- SARFI₉₀ : 순간전압강하의 총수를 정하는 기준
- SARFI₈₀ : 대부분의 민감부하가 문제를 일으키는 전압 레벨

기술동향

- SARFI₇₀ : 계통의 Performance 레벨을 단일 지수로 사용
- SARFI₅₀ : SEMI 2844의 새로운 표준에 추가
- SARFI₁₀ : 순간정전 평가 기준
- SARFI_{CBEMA} : CBEMA곡선을 위반하는 순간전압강하 횟수
- SARFI_{ITIC} : ITIC곡선을 위반하는 순간전압강하 횟수
- SARFI_{SEMI} : SEMI곡선을 위반하는 순간전압강하 횟수
- SARFI_{CUSTOMCURVE} : 수용가 기기의 특성곡선을 위반하는 순간전압강하 횟수

SARFI_X 지수는 일반적으로 계통의 신뢰도 평가에 사용되는 SAIFI(System Average Interruption Frequency Index)와 유사한 방식으로 산출되지만, SAIFI가 영구정전을 다루는 데 비해 SARFI_X는 순간전압변동을 다루고 있다. 이러한 SARFI_X 지수는 송배전계통의 사고 기록 및 수용가 기기의 특성, 가능한 순간전압강하 발생조건 등을 바탕으로 추정될 수 있는데, 특정 사이트의 정확한 평가를 위해서는 지속적인 모니터링이 필요하다. EPRI의 신뢰도 평가 방법 기술서와 IEEE Standard 1159에서는 SARFI_X 지수를 순간전압강하의 지속시간에 따라 SIARFI_X, SMARFI_X, STARFI_X 로 구분하고 있다. EPRI의 DPQ에서 나타난 계통의 순간전압강하에 대한 지수는 표 3에 나타나 있다.

다. Sag Score

미국의 전력회사인 Detroit Edison은 Ford Motor Company의 Shedon Road Plant에 대한 2년간의 모니터링 자료를 기반으로 'Special Manufacturing Contracts with the Automotive Companies'를 맺고, 1996년 11월 STS(Static Transfer Switch)를 설치하여 순간전압강하에 대한 보상서비스를 제공하고 있는데, 이에 대한 근거로 Sag Score를 사용하고 있다. 이 Sag Score는 전압 강하분의 평균치로 산출하는데, 지수 산출이 간단하다는 장점을 가지고 있지만 순간전압강하의 지속시간을 고려하지 않고 기기에 대한 영향을 선형적인 것으로 가정하고 있다.

라. UNIPED DISDIP Table

1985년 UNIPED는 DISDIP이라는 그룹을 주축으로, 오스트리아, 프랑스, 이탈리아, 네덜란드, 노르웨이, 스웨덴, 스위스, 영국, 독일의 9개 나라의 85개 사이트(33개의 케이블계통과 52개의 가공선-케이블 혼합계통)에 대한 모니터링을 실시하여 DISDIP Table을 제시하였다(표 4 참조).

마. ESCOM Voltage Dip Table

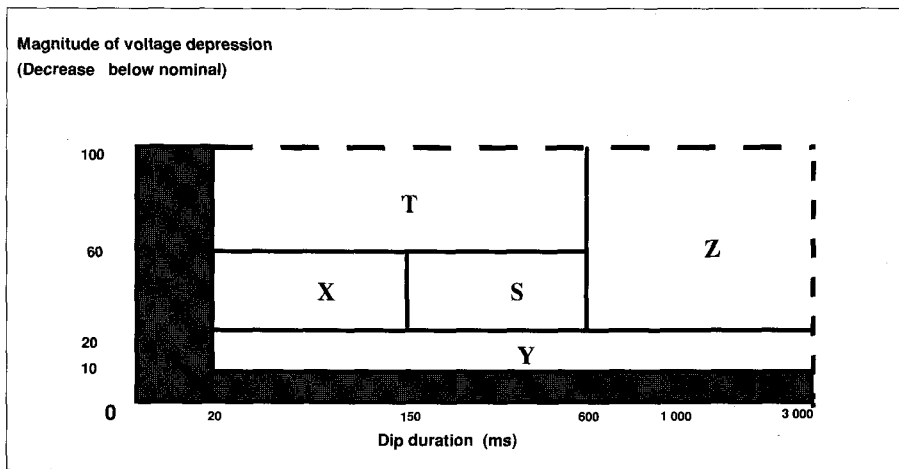
The South Africa NRS 048에서는 ESCOM과 공동으로 다년간의 모니터링을 통해 Guaranteed Voltage Sag Performance Level과 Indicative Voltage Sag Performance Level에 대한 Dip Table을 제시하여 수

〈표 3〉 EPRI DPQ mean magnitude and duration levels

SARFI index	0~0.2sec	0.2~0.5sec	0.5~3sec	3~60sec	Total
SARFI ₉₀	41.65	7.74	5.17	2.72	57.28
SARFI ₈₀	21.53	3.94	3.12	1.89	30.49
SARFI ₇₀	13.55	3.01	2.31	1.71	20.57
SARFI ₅₀	6.35	1.91	1.54	1.74	11.53
SARFI ₁₀	1.35	0.74	1.43	1.04	4.56

〈표 4〉 UNIPEDD DISDIP Table
(Highest number of events for cable networks excluding the top 5%)

Depth	10ms~100ms	100ms~500ms	500ms~1sec	1sec~3sec	3sec~20sec	20sec~60sec
10~30%	23	19	3	1	0	0
30~60%	5	19	1	0	0	0
60~90%	1	8	1	0	0	0
100%	0	0	1	0	1	1



〈그림 6〉 ESCOM Voltage Dip Table

〈표 5〉 Voltage Performance Level from NRS 048

Network voltage range	Number of voltage dips per year				
	Dip window category				
	S	T	X	Y	Z
6.6kV to ≤ 44kV	30	30	100	150	20
6.6kV to ≤ 44kV Rural	69	54	215	314	49
>44kV to ≤ 132kV	25	25	80	120	16
220kV to ≤ 765kV	11	6	45	88	5

Note) The network voltage is not necessarily the voltage at which the customer takes supply. It is the voltage of the network that feeds the point of common coupling.

용가의 계획과정에 반영하고 있다. ESCOM에서는 이 Dip Table을 바탕으로 1997년에 제지회사인 Sappi Limited의 Stanger Mill과 'Quality Plus Contract'를 맺고 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)를 이용한 직렬보상장치를 설치하여 운영하고

있다.

ESCOM의 Voltage Dip Table에서는 순간전압강하의 크기와 지속시간에 따라 나누어진 S, T, X, Y, Z의 범주에 연간 최대 발생 횟수를 기록하고 있다(그림 6, 표 5 참조). (다음호에 계속)