

친환경 Ultra-capacitor에 의한 순시전압강하의 직렬전압보상 시스템

논문

58-4-15

Series Voltage Compensation Systems for Voltage Sag by Using an Environmentally Friendly Ultra-capacitor

손진근[†] · 전희종^{*}
(Jin-Geun Shon · Hee-Jong Jeon)

Abstract – A series voltage compensation(SVC) system is a power-electronics controller that can protect sensitive loads from disturbance in the supply system. Especially, voltage sags are considered the dominant disturbances affecting the power quality. This paper dealt with a system of off-line type voltage sag compensation by using a bi-directional DC/DC converter of environmentally friendly ultra-capacitor. This capacitor is attached to the DC link of SVC through the high-efficiency DC/DC converter in order to compensate the DC link voltage drop during short-term power interruption as voltage sags.

Therefore, in this paper, a DC/DC converter to control high-efficiency energy of ultra-capacitor and voltage sag detection algorithm of off-line type SVC systems are newly introduced. According to the results of experimental of prototype system, it is verified that the proposed system has effectiveness of voltage sag compensation using an ultra-capacitor.

Key Words : Series Voltage Compensation(SVC), Voltage Sag, Sensitive loads, Ultra-capacitor, Bi-directional DC/DC Converter, Off-line Type, High-efficiency Energy.

1. 서 론

근래에 전기품질에 대한 관심이 고조되면서 다양한 전기 품질 보상장치의 주문형 전력(custom power) 기기들이 연구되고 있다. 전기품질의 중요성이 커진 이유는 전력계통에 전기적 외란에 민감한 부하장치들의 사용이 많아졌기 때문이다. 특히, 전기의 품질 중에서 전압크기의 변동에 대한 중요성이 대두되면서 순시전압강하(voltage sag) 또는 순간정전(momentary interruption) 등에 대한 전압보상시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

과거 몇 년 전 까지만 해도 수용가 측에서는 전력의 중단 없는 공급 요구에 따라 무정전전원장치(UPS)의 보급이 보편화 되었으나 최근에는 순시적(instantaneous) 전압의 크기 변동이 발생하면서 새로운 보상시스템이 등장하기 시작하였다. 이러한 순시적 전압크기 변동은 낙뢰, 스위칭 씨어지, 바람 등의 원인에 의해서 자동되는 재폐로(recloser) 보호방식의 일시적 사고 차단시스템에 의해서 주로 발생하게 되며 주로 순시전압강하가 거의 대부분을 차지하게 된다[1-5]. 이의 보상시스템으로는 민감 부하에 공급되는 전압 중에서 전압강하가 발생한 크기 만큼을 부하에 추가로 공급해주는 직렬전압보상(SVC;series voltage compensation, 이하 'SVC'라 칭함[2]) 장치가 있으며 동적전압보상기(DVR; dynamic

voltage restorer)라고도 불리운다[3,4].

따라서 본 논문에서는 제한된 부하범위에만 사용되는 UPS 대신에 순시전압강하의 순간에만 전압을 주입하여 보상 부하범위를 확장해 주는 상시대기(stand-by)형 SVC 시스템 개발에 관하여 연구하였다. 이때의 전압보상은 DC에너지 저장장치를 이용하게 되는데 이의 장치로는 전해커패시터(electrolytic capacitor), 2차전지인 납축전지 그리고 친환경 ultra-capacitor 등을 고려할 수 있다. 종래의 보상시스템으로는 전해커패시터를 사용하여 충방전 응답속도를 매우 빠르게 할 수 있으나 이는 에너지 저장밀도가 매우 낮아 전압보상시간이 아주 짧고, 고온에서 수명이 짧으며 수명 말기에는 전해액 증기가 분출하여 폭발의 위험성이 있는 등 많은 문제점이 존재하였다[6,7].

또한 UPS 분야 등에 널리 사용되는 납축전지의 경우에는 에너지 밀도가 높다는 장점이 있으나 충방전 속도가 매우 느리고 대전류 급속 충방전이 불가능하며, 수명이 낮아 주기적인 유지보수가 필요하게 된다. 특히, 환경적으로 심각한 문제를 유발시키는 요인 때문에 사용의 한계점이 있는 실정이다.

이러한 이유로 본 논문에서는 전해커패시터와 납축전지의 장점들을 조합한 친환경 ultra-capacitor를 에너지 저장장치로 사용하는 off-line형(또는 stand-by) SVC 시스템을 소개하고자 한다. 구체적으로는 ultra-capacitor의 특성을 고려한 양방향성 DC/DC 컨버터에 의한 고효율 제어기법을 소개하고, 순시전압강하의 위상 및 전압 보상특성을 강화시키기 위한 새로운 전압 계측기법을 제시하였다. 10[kVA]-3[초] 보상의 에너지 저장능력이 있는 ultra-capacitor를 실장한 DSP

[†] 교신저자, 정회원 : 경원대학교 전기공학과 부교수 · 공박

E-mail : shon@kyungwon.ac.kr

* 시니어 회원 : 충실대학교 전기공학부 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 2월 2일

최종완료 : 2009년 3월 13일

기반의 시작품 제작의 SVC 실험결과는 위의 제안에 대한 타당성을 입증시켜 주었다.

2. Ultra-capacitor의 특성과 고효율 충전제어

2.1 Ultra-capacitor의 특성

Ultra-capacitor는 일명 수퍼커패시터라고도 불리우는 친환경적 에너지 저장장치이다. 이는 표면적이 매우 넓은 다공질의 활성탄소를 분극성 전극에 응용하는 전기이중층커패시(Electric Double Layer Capacitors ;EDLC)와 고분자나 산화물재료를 이용하는 의사(Pseudo)커패시터가 있으나 상용화된 제품은 주로 EDLC이므로 이를 통상 ultra-capacitor라 부르게 된다. 이는 전해 커패시터보다 정전용량이 수백 배 이상 크다는 장점이 있다. 또한 배터리는 비교적 작은 부피와 중량으로 많은 에너지를 저장할 수 있으나 이는 종류와 무관하게 저장효율 및 온도특성, 사이클 수명이 낮다는 단점 갖고 있다. 이는 배터리의 사용에 따른 화학물질의 열화현상 때문이다[6].

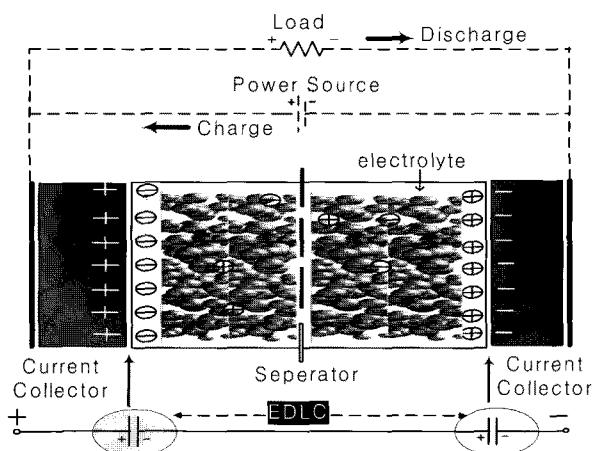


그림 2.1 Ultra-capacitor의 동작구조

Fig. 2.1 Operational structure of ultra-capacitor.

표 2.1 각 에너지 저장장치의 특성비교

Table 2.1 Comparison in Characteristics of each energy storage system.

특성 종류	주요 특징	주요성능		
		Wh/ kg	효율 (%)	온도 (°C)
전해커패시터	• 온도/주파수 특성 미흡 • 고온에서 수명감소 • 전해액 증기	~0.1	90 ~98	-25 ~65
납축전지	• 수명 및 환경문제 • 사용 온도제한 • 효율문제	20 ~100	70 ~85	-20 ~70
Ultra-capacitor	• 환경친화적 • 작동온도범위넓음 • 20년(이상)의 수명	2 ~10	90 ~95	-40 ~90

그러나 ultra-capacitor는 배터리보다 저장할 수 있는 에너지는 작지만 아주 짧은 시간동안의 순시 첨두 전력을 공급할 수 있는 능력이 배터리의 10 배에서 100 배 이상이므로 수초 또는 수 시간 에너지를 저장하고 있다가 큰 전력이 필요할 경우 에너지를 공급할 수 있다. 특히 ultra-capacitor EDLC는 전기를 저장하는 메커니즘이 화학반응을 이용하는 배터리와 달리 전해질의 계면에 형성되는 이온층에 전하를 저장하므로 즉, 물리적인 전하의 축적에 의한 축전현상을 이용하므로 반복 사용에 따른 열화현상이 없어 사이클 수명에 제한이 없고, 독성물질도 포함하지 않는 환경친화형 제품이라 할 수 있다. 이에 대한 동작원리와 특성을 그림 2.1과 표 2.1에 각각 나타내었다[6,7].

2.2 Ultra-capacitor의 고효율 충전제어

그림 2.2는 ultra-capacitor의 충전시 전류원 회로구조에 의한 제어의 필요성을 나타내기 위한 등가회로 구조이다. 그림 2.2의 (a)와 (b)는 각각 전압원 및 전류원에 의한 충전 등가회로를 나타낸다. 그림 2.2의 (a)회로와 같이 만약 완전히 방전한 커패시터의 전압 V_0 가 0[V]이고 내부저항이 R 인 대용량 EDLC에 발전기의 기전력 V 를 인가하면 충전전류 I 는 V/R 만큼 흐를 수 있지만 발전기(Power Generator)의 축면에서 보면 이는 부하가 단락된 상태이므로 보호회로가 없으면 발전기는 곧 소손된다.

또한 커패시터 단자전압 V 는 충전에 의해 흘러들어온 전하 Q 에 의해 $V = Q/C$ 의 비율로 상승하지만 정전용량 C 가 작다면 부하가 단락된 상태와 비슷한 크기의 대 전류가 흐르게 되는 것이므로 극히 짧은 시간 내에 충전이 끝나게 된다. 따라서 이러한 경우 그림 2.2(a)의 전압원 충전은 적당하지 않고 그림 2.2(b)와 같은 전류원 제어회로에 의한 충전이 필요하게 된다. 이와 같이 EDLC는 전압원에 의한 충전은 적당하지 않지만, 2차 전지인 납축전지는 그 자체가 전압원이기 때문에 전압원으로부터 충전하여도 별다른 문제는 생기지 않는다.

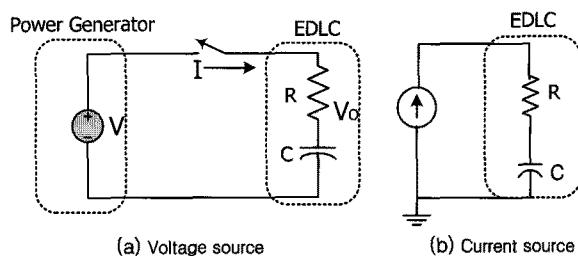


그림 2.2 Ultra-capacitor의 충전 등가회로

Fig. 2.2 Charge equivalent circuits of ultra-capacitor.

그림 2.2(a)와 같은 EDLC의 전압원 회로에서 전압원 V 와 정전용량 C 사이에 연결된 저항 R 을 통하여 $t[\text{sec}]$ 후에 흐르는 전류 I 는 식 (1)과 같이 된다.

$$I = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

이때 저항 R 에서 소비되는 전력은 식(2)와 같으며, 이는

커패시터에 축적될 수 있는 에너지를 나타내는 식과 같게 되기 때문에 정전압원에서 충전을 수행할 경우의 에너지 효율은 50[%]가 됨을 식(2)에서도 알 수 있다.

$$\int I^2 R dt = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

그러나 그림 2.2(b)와 같이 전류원에 의한 EDLC의 충전 효율은 다음과 같이 정할 수 있다. 즉, 정전류 I 로 t 시간 동안 충전하였을 경우에 전하량 Q 는 식(3)으로 표현된다. 따라서 EDLC에 저장된 전력량 X 는 식(4)와 같이, 저항 R 에서 소비되는 전력량 Y 는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = I \cdot t \quad (3)$$

$$X = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \quad (4)$$

$$Y = I^2 R \cdot t = R \cdot \frac{Q^2}{t} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)의 두 식의 관계를 이용하여 충전 전력량에 대한 소비되는 전력량의 손실 K 를 구하면 식(6)과 같이 된다. 이 식에서 충전시간 t 가 길어질수록 충전량에 대한 손실의 비율 K 를 줄일 수 있으며 결과적으로 그림 2.2(b)와 같은 전류원 제어회로에 의하여 충전 효율을 제어할 수 있다.

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{2RC}{t} \quad (6)$$

위의 식(6)에 근거하여 정전류원에 의한 충전시의 효율 η_C 와 방전시의 효율 η_D 는 식(7) 및 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(6)과 마찬가지로 충방전시간 t 에 의하여 효율을 제어할 수 있다.

$$\eta_C = \frac{X}{(X+Y)} = \frac{t}{(t+2RC)} \quad (7)$$

$$\eta_D = \frac{(X+Y)}{X} = 1 - \frac{2RC}{t} \quad (8)$$

3. 순시전압강하의 발생과 직렬전압보상(SVC)

3.1 순시전압강하의 발생

전기품질에 대한 전압크기의 변동은 배전시스템에서의 재폐로(auto-recloser) 수행 시 발생하는 사고선로의 순간정전과 인근선로의 순시전압강하 등이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 이유로 인하여 IEEE standard 1159-1995에서는 영구정전(sustained interruption)을 1분 이상 지속되는 것으로 정의하였으며, 순시전압강하 및 상승의 지속시간은 8.3~500[ms], 순간정전(momentary interruption)은 8.3[ms]~3[s], 순간전압강하 및 상승시간 역시 8.3[ms]~3[s]로 규정하고 있다[4,8].

또한, 자연재해 등의 원인 제공에 의한 자동 재폐로시 발생하는 순시전압강하 및 순간정전의 발생 빈도를 살펴보면 다

음과 같다.

• 미국의 경우 : 그림 3.1과 같이 EPRI에서 미국전역에 대하여 1990년대 후반 경에 순시전압강하의 발생빈도를 조사한 결과로서 10~20[%]의 순시전압 사고, 즉 전압 실효값이 80~90[%]로 유지되는 사고발생 횟수가 나머지 사고에 비하여 훨씬 많이 발생하여 연간 평균 약 20회 정도 발생하고 있으며, 전 전압 범위 내에서 전력품질 사고발생 횟수는 연평균 41회 정도로 나타나고 있다고 보고되고 있다 (단, 이들의 수치는 지역이나 계통구성에 따라서 다르고 발전소 등 전원이 많은 지역에서 전압강하가 발생하는 횟수는 인접의 전원이 없는 지역에 비하여 20[%]이상 적게 나타난다고 보고 됨). 이는 특히 전압의 크기가 50[%]이하, 지속시간이 3 [cycle]이하인 순시전압강하의 경우에서 발생빈도가 가장 높다고 보고되고 있다[9].

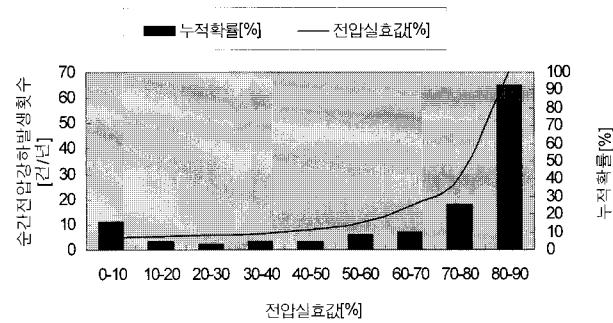


그림 3.1 순시전압강하의 분포(EPRI 조사 결과)

Fig. 3.1 Distribution of voltage sag(EPRI).

• 국내의 경우 : S대학에서 한전의 협조를 받아 국내 J변전소에서 취득한 4년간의 사고 통계이다[9]. 그림 3.2는 사고 발생시 주변압기 2차 측 모션에서 측정된 순간전압을 크기별로 분류하여 발생횟수를 조사한 것으로써 순시전압강하가 10~20[%]인 사고, 즉 전압 실효값이 80~90[%]로 유지되는 사고발생횟수가 나머지 사고에 비하여 훨씬 많이 발생하며 연간 평균 약 17회 발생하고 있으며 전 전압 범위 내에서 전력품질 사고발생횟수는 연 평균 55회로 나타나고 있다.

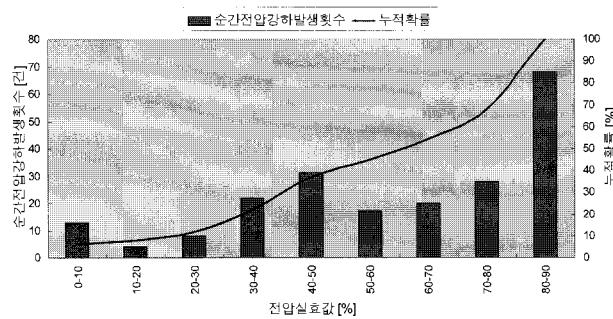


그림 3.2 순시전압강하의 분포(국내J 변전소)

Fig. 3.2 Distribution of voltage sag(domestic J substation).

또한 표 3.1은 국내의 수원에 위치한 S공장에서 측정한 순시전압강하에 대한 자료이다. 여기에서 한전의 송전선로는 모두 Loop로 연계되어 있어 의정부, 이천, 당진, 울진과

같이 타 지역 전력계통 순간고장발생시 전 수용가에서도 순시전압강하가 발생함을 알 수 있다[8].

표 3.1 수원인근 순시전압강하의 발생(line voltage : 154[kV])

Table 3.1 Generation of voltage sag(near SUWON)

일시	Sag 전압 [V]	Sag 레벨 [%]	지속 시간 [ms]	이상 사유
'00년 4월	13,387	12	183	용인-분당 열병합 송전선로 Trip
	12,800	8	288	용인#1,2(송전선로 낙뢰로 동작)
	34,000	22	84	한전신갈-신용인 신갈#1 T/L 재폐로 동작
'00년 5월	13,820	9	100	양주-의정부간 345[kV] 양주#2 T/L
	19,700	13	100	의정부간 345[kV] 양주#1 T/L 낙뢰
	14,000	9	500	수원 가전사업장 사고 영향
	18,500	12	116	동서울 변전소 DS Flash Over
	24,000	16	100	서인천화력 발전소 Main변압기 이상
	24,000	16	120	서인천발전소 주변압기 재투입 이상
'00년 6월	53,000	34	217	서인천화력 발전소 구내 GIS사고
	32,000	21	250	신시흥발전소 낙뢰로 345[kV] 계통이상
	27,000	18	83	우만 T/L 낙뢰로 재폐로 동작
이후 종락				

3.2 직렬전압보상(SVC) 시스템의 도입

배전계통에서 자연적 재해 또는 인위적 재해요소에 의해 나타나는 순시전압강하를 보상하기 위하여 적용된 순시전압강하 보상장치에 대한 전형적인 설치 예를 그림 3.3에 나타내었다. 이 그림에서와 같이 순시전압강하의 전압보상장치는 근접한 곳에서의 저락사고 및 인위적인 재폐로 보호방식으로 인하여 발생되는 전원의 순시전압강하로부터 민감한 부하를 보상하기 위하여 배전계통과 직렬로 연결되어 사용되기 때문에 이의 보상장치를 직렬전압보상(series voltage compensation;SVC) 시스템[2]이라고 하며 이를 동적전압보상장치(dynamic voltage restorer;DVR)라고도 한다.

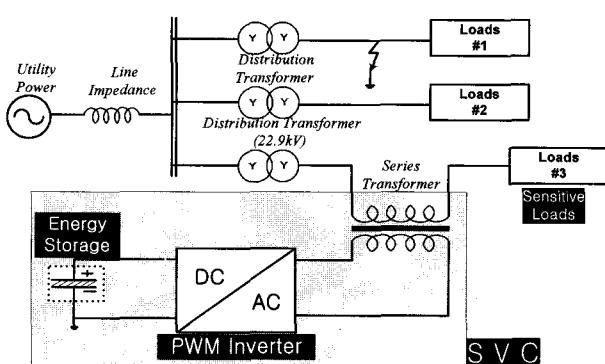


그림 3.3 SVC의 구성 다이어그램

Fig. 3.3 Configuration diagram of SVC.

그림 3.3을 구체적으로 설명하기 위하여 그림 3.4와 같이 등각모델로 다시 표현할 수 있다. 부하 측에서 본 계통의 전압을 V_s 라고 하고, 전송 선로 및 부하 임피던스는 Z_{line} 및 Z_{load} ,

부하 인근의 합성 임피던스를 Z_D 라 정의할 때, 정상적인 상태에서는 Z_D 와 Z_{load} 가 적절한 균형을 이루며 Z_{load} 의 양단전압 V_{load} 가 공정 전압을 유지하게 된다.

그러나 사고가 발생하게 되면 Z_D 가 짧은 시간 동안 급격하게 변화하므로 V_{load} 가 변화하게 되며, 전압 Sag는 Z_D 가 정상상태에 비하여 작아지는 경우로 $Z_D \ll Z_{load}$ 와 같은 관계가 성립되고 많은 전류가 Z_D 를 통하여 흐르게 되어 부하에 공급되는 전력이 감소하고 결과적으로 부하에 인가되는 전압이 낮아지게 된다. 따라서 순시전압강하로 부터 민감한 부하 전압을 보상하기 위하여 배전계통과 직렬로 연결된 별도의 SVC를 구성하고 이의 등가회로를 그림 3.4와 같이 나타낸다.

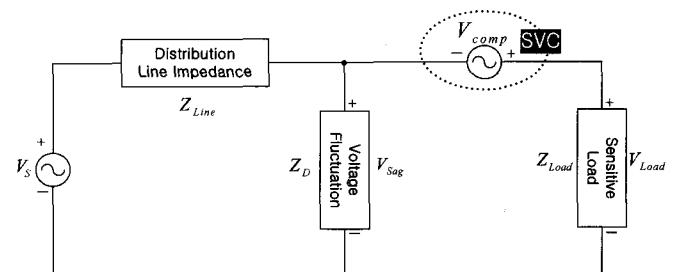


그림 3.4 SVC의 등가회로

Fig. 3.4 Equivalent circuit of SVC.

4. SVC 시스템의 구성

4.1 DC/DC 컨버터를 포함한 SVC

본 논문에서 구현하고자 하는 직렬전압보상장치 SVC의 전체 구성도를 그림 4.1에 나타내었다. 평상시 전력공급이 정상적일 때는 작동 대기 중(stand-by)에 있으며서 DC/DC 컨버터는 2.2절에서 설명한 것처럼 고효율 제어기에 의한 충전을 시작하게 된다.

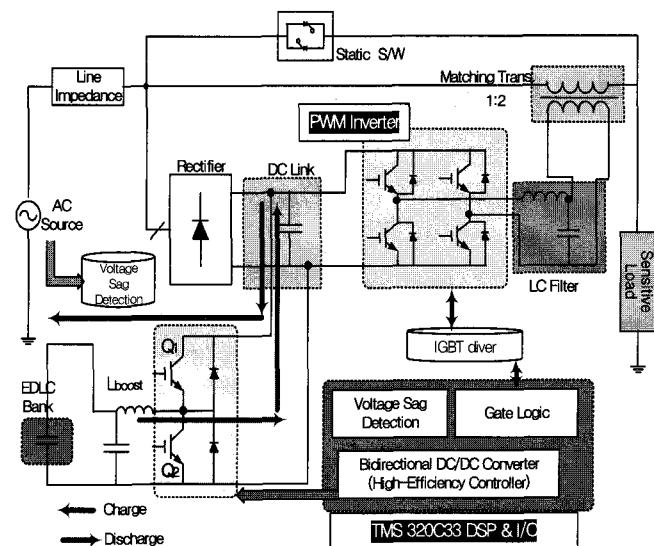


그림 4.1 DC/DC 컨버터를 포함한 SVC의 전체구성도

Fig. 4.1 Overall diagram of SVS included DC/DC Converter.

또한 순시전압강하 및 순간정전이 발생하는 순간에는 이의 전압을 검출하여 off-line 방식으로 SVC가 전압을 보상하게 된다. 이때의 DC/DC 컨버터는 그림 4.1과 같이 방전모드로 전환하여 약 3[초]동안 민감부하를 보호하게 되는 방식이며 이러한 시스템의 설계사양을 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1 SVC의 시스템 설계사양

Table 4.1 Designed specification of SVC system.

Output Power	10[kVA]						
Compensation Time	1-3[sec]						
Required Load Energy	10kVA×3sec=30[kWs]=30[kJ]						
DC Characteristics	VAC(220[V])× $\sqrt{2}$ =311[V], IDC=10kVA/311V=32[A]						
DC-link DC/DC converter	Buck Mode : 90 [V], Boost Mode : 310[V]						
Ultra-capacitor (EDLC)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Voltage</td> <td style="padding: 2px;">(2.5[V], 600[F], 18[EA] Series) ⇒ 45 [V] X 2[set]</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">C(total)</td> <td style="padding: 2px;">33.33/33.33[F] ⇒ 16.67[F]</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">R(total)</td> <td style="padding: 2px;">8.77 [mΩ]</td> </tr> </table>	Voltage	(2.5[V], 600[F], 18[EA] Series) ⇒ 45 [V] X 2[set]	C(total)	33.33/33.33[F] ⇒ 16.67[F]	R(total)	8.77 [mΩ]
Voltage	(2.5[V], 600[F], 18[EA] Series) ⇒ 45 [V] X 2[set]						
C(total)	33.33/33.33[F] ⇒ 16.67[F]						
R(total)	8.77 [mΩ]						
AC LC Filter	L : 2.8 [mH], C : 40 [μF]						
DC Inductor(L_{boost})	4.8 [mH]						
IGBT : SKM100GAL123D (1200V/100A)	Switching frequency:10[kHz]						

그리고 이에 적용된 ultra-capacitor는 아래의 절차와 같이 선정하였으며, 이때의 DC/DC 컨버터는 ultra-capacitor의 낮은 내압특성을 고려하여 충/방전시에 강/송압 모드전환이 이루어지는 양방향성 컨버터가 적용된다.

①. 이때의 ultra-capacitor 에너지 설계 시에는 SVC 인버터와 민감부하 사이에는 EDLC의 낮은 VDC 전압의 모듈셋을 고려하여 약 1 : 2 의 승압변압기를 사용한다는 전제 하에 90[V]를 사용한다. 또한 EDLC 수명 및 운전의 최적조건은 EDLC 모듈 셋의 전압범위가 50[%]인 경우가 적절하다는 경험치 보고에 의하여 VDC를 45[V]로 설정하며 이때의 에너지 사용 범위는 75[%]에 해당된다.

②. 이를 근거로 단위 셀의 내압은 2.5[V] × 18[EA] 직렬셋을 조합하여 45[V]로 설정하여 이를 모듈로 만들어 2개의 뱅크가 되도록 하며 또한 EDLC 단위 셀은 보상시간을 고려하여 600[F]로 정한다. 그리므로 한 개의 뱅크는 45[V], 33.33[F]이 되며 직렬 조합된 두 개의 뱅크는 90[V], 16.67[F]이 된다.

③. 정전용량 에너지저장의 공식에 적용하여 보면, $1/2 \times 16.67 \times (90^2 - 45^2) = 50.63[\text{kJ}] = 14.06[\text{Wh}]$ 이다. 10[kVA] DVR인버터 사용에 의한 부하역률을 0.8로 설정하면 $14.06[\text{Wh}] = 12,500 \times 4.05[\text{초}]$ 이며 이는 내부저항 등을 고려한다 하더라도 목표 보상시간 3초를 약간 상회한 값이 된다.

4.2 SVC의 작동을 위한 전압계측

우선 SVC 시스템의 작동을 위해서는 무엇보다 전원전압의 검출이 우선되어야 한다. 본 논문에서는 절연 전압계측 소자인 AD210AN을 사용하여 ADC를 거쳐 DSP 연산처리하였다. 이의 계측은 순시치 이동평균기법을 이용한 RMS 계측기법을 이용하였는데, 이때의 RMS 연산과정에서 발생

하는 절단오차(truncation error) 때문에 오차가 가중되어 누적되게 된다. 이를 보정해주기 위하여 본 논문에서는 고정도의 RMS-to-DC Converter인 AD637을 사용해 하드웨어적으로 RMS 값을 한번 더 계측하여 DSP 계측부에서 이를 보정하였다.

본 논문에서 구성된 전압강하의 검출 알고리즘은 그 크기 및 위상, 특히 전압 주입시 입력과의 동기화에 대한 정확한 위상각의 투입이 중요하다. 이를 위해서는 정확한 제로 크로싱이 고려되어져야 하며, 본 구성에서는 그림 4.2와 같은 개선된 알고리즘의 방식을 사용하였다. 이 방식은 위상각 θ 가 0도, 180도, 360도에서 단순하게 전압의 크기만을 비교하여 제로 크로싱을 하는 방식을 탈피하여, 그림과 같이 매 샘플링마다 논리연산자를 도입하고 특히 위상각 θ 가 예지의 상승 및 하강 순간에 논리곱(and logic)이 추가되어 비교하도록 함으로써 계측에러를 감소하도록 하였다.

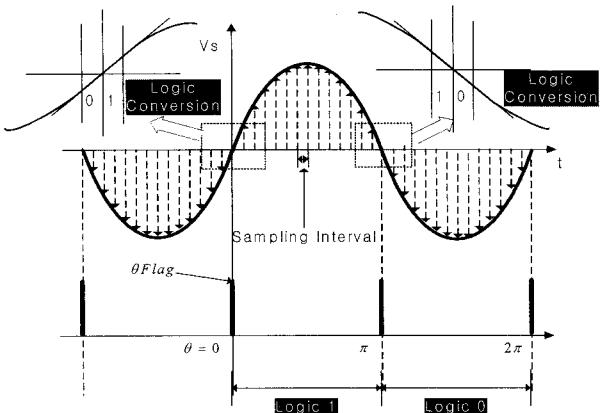


그림 4.2 전압크기변동의 위상각 검출기법

Fig. 4.2 Phase angle detection of voltage sag.

5. 실험결과 및 고찰

그림 4.1 및 표 4.1에 근거하여 상시대기형(off-line형) 단상 SVC 시스템의 파워스택 및 10[kVA]-3[초] 보상용 ultra-capacitor의 보상장치를 그림 5.1과 같이 제작하여 실험을 수행하였다. 그림의 우측 상단은 ultra-capacitor 모듈의 내부 모습을 나타내고 있다.

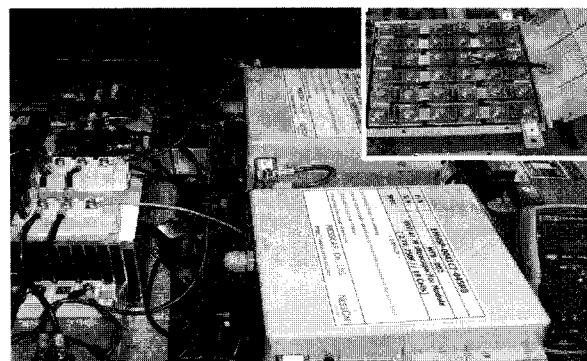


그림 5.1 SVC 시스템의 파워 스텍과 ultra-capacitor 모듈

Fig. 5.1 Power stack and ultra-capacitor module of SVC system.

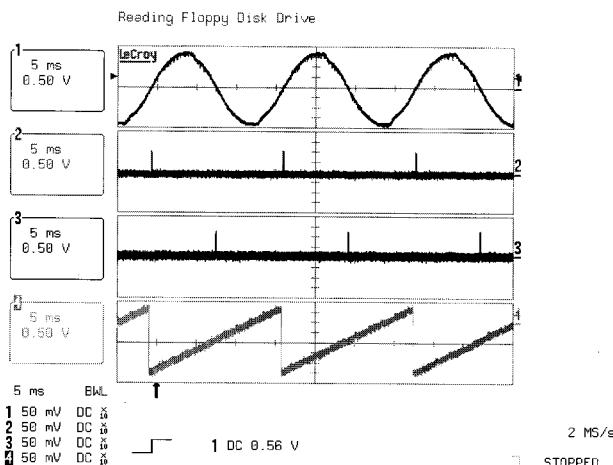


그림 5.2 입력전압의 제로크로싱 위상검출

Fig. 5.2 Zerocrossing phase detection of input voltage.

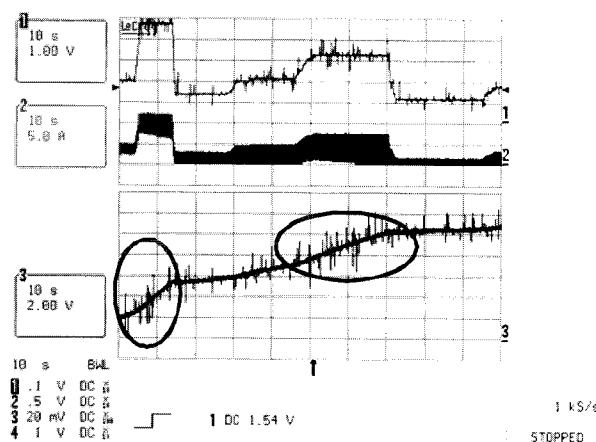


그림 5.3 DC/DC 컨버터의 전류제어 추종

Fig. 5.3 Current control waveform of DC/DC converter.

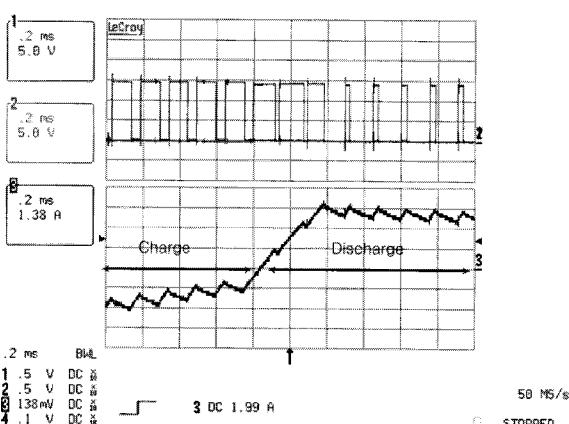


그림 5.4 DC/DC 컨버터의 충방전 모드전환

Fig. 5.4 Charge/Discharge mode conversion of DC/DC converter.

그림 5.2는 SVC 시스템에서 정확한 위상각의 직렬전압주입을 위한 제로크로싱 위상각 검출 알고리즘을 새롭게 구현한

과정이다. 샘플링 시간마다 로직기능을 부가하여 입력전압 상승과 하강순간에 에지신호 플래그를 발생시켜 나타내었다.

그림 5.3은 ultra-capacitor를 고효율로 제어하기 위한 DC/DC 컨버터의 제어기 추종실험을 나타낸 것이다. 충전 전류지령과 추종응답을 채널1,2에 나타내었고, 채널3에 ultra-capacitor의 전압충전과정을 나타낸 것으로 전류제어가 원활히 수행되고 있음을 보인다. 전류의 크기지령 만큼이나 급속으로 충전전압이 반응하게 되는 것을 타원으로 나타내었다. 마찬가지로 그림 5.4는 ultra-capacitor의 특성을 고려하여 강압/승압형 구조로 DC/DC컨버터를 설계한 경우에 있어서의 PWM 게이트 제어파형과 이의 충방전 전류의 전환 특성을 잘 나타내고 있다.

그림 5.5와 그림 5.6은 각각 순시전압강하동작에 의한 SVC의 동작 과정을 나타낸 것이다. 채널1은 AC입력의 전압 Sag를 A/D 컨버터하여 나타낸 값으로 이를 RMS 계산하여 채널2에 나타내었다. 이의 전압을 직렬보상하여 SVC 동작 후에는 채널3과 같이 민감부하에서 일정전압을 유지하고 있고, 채널4에서 SVC 인버터가 동작된 후의 보상전류를 각각 나타낸 것으로 제안 시스템이 잘 동작하고 있음을 보여준다.

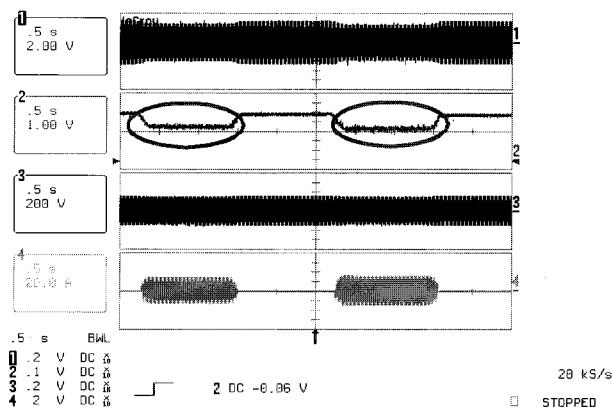


그림 5.5 순시전압강하 반복동작에 의한 직렬전압보상

Fig. 5.5 Series voltage compensation for voltage sag repeat.

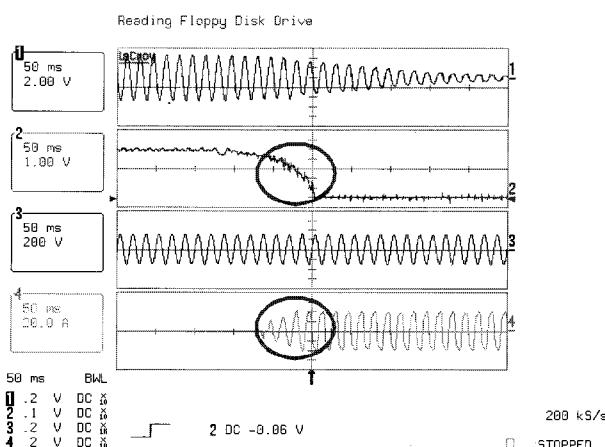


그림 5.6 순시전압강하에 대한 직렬전압보상

Fig. 5.6 Series voltage compensation(SVC) for voltage sag.

6. 결 론

최근에 전력에너지 저장장치에 대한 관심이 지대한 가운데 새로운 친환경소재인 ultra-capacitor가 개발되면서 그 용분야가 다양하게 전개되고 있다. 하이브리드 자동차 및 태양광발전 분야 등에도 확대되겠지만 또한 주문형 전력기기 분야에도 그 용도가 다양하리라 예측된다. 본 논문에서는 ultra-capacitor가 전해 커패시터와 남축전지의 단점을 배제하고 에너지 축적용량 및 수명, 그리고 환경면에서 유리하다는 점에 착안하여 이를 전기품질의 향상기기인 순시전압강화보상장치의 SVC 시스템에 적용하였다.

ultra-capacitor의 특성에 맞춘 고효율 충방전 제어기법을 제안하여 승강압형 DC/DC 컨버터에 적용하였고, 또한 하드웨어가 보강된 순시치 RMS 전압 계측기법 및 로직시퀀스가 보강된 제로크로싱 위상각 검출기법을 새로 소개하여 이를 SVC 시스템에 적용하여 실험하였다. 10[kVA]-3[초]간의 보상능력을 갖는 파워 스택 및 DSP에 기반한 시작품을 개발하여 실험을 수행하였고 이의 결과는 만족할 만 한 성과를 얻어냈다. 따라서 이의 실험 결과는 UPS나 태양광발전용 인버터 등 다른 주문형 전력기기(custom power기기)의 연구에 토대를 마련할 것이라 사료된다.

참 고 문 현

- [1] D. Mahinda Vilathgamuwa et al, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans., POWER DELIVERY, Vol.18, NO.3, pp.928~936, July 2003.
- [2] G. Joos, "Three-Phase Static Series Voltage Regulator Control Algorithms for Dynamic Sag Compensation", IEEE ISIE, pp.515~520, 1999.
- [3] M. F. Granaghan, "Dynamic Sag Corrector : Cost Effective Industrial Power Line Conditioning", IEEE IAS, pp.1339~1344, 1999.
- [4] Math H. J. Pollen, Understanding Power Quality Problems, IEEE Press, 1999.
- [5] A. Ghosh and G. Ledwich, "Compensation of distribution system voltage using DVR", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp. 1030~1036, 2002, Oct.
- [6] Florida Educational Seminars, Inc., "The 10th International Seminars on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices", December 3~5,2001.

- [7] 김종희, "에너지저장 기술: 전기화학 축전기 신기술과 응용", 전력전자학회지, 제7권 제2호, pp.13~17, 2002.4.
- [8] IEEE Std. 1346-1998, "IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment".
- [9] 김재철 외 3명, "배전계통의 순간전압변동에 의한 수용 가족 영향의 현황분석", 한국조명·전기설비학회논문지, 제12권 4호, pp.37~46, 1998.11.
- [10] <http://www.pqcounter.com/>
- [11] 손진근 외 3명, '개선된 계측 및 스위칭 기법을 이용한 정전류조정 인버터 시스템', 대한전기학회 논문지, 제56P권, 제4호, 2007.12.

저 자 소 개

손 진 근 (孫 珍 励)



1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1992 ~1995 현대중공업(주) 기전 연구소 주임연구원. 2002. 2~2003. 2 일본(국립) 가고시마대학 전기공학부 해외 Post-doc. 1997~현재 경원전문대학/경원대학교 전기공학과 부교수.



전 희 종 (田 喜 鍾)

1975년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
1977년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1977~1981 공군사관학교 전자공학과 교수부. 1987년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1996년 Univ. of Victoria. CA. 객원교수. 1983년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수. 현 숭실대학교 공과대학장.