

에너지저장시스템을 이용한 전류품질 개선에 관한 연구

全瑩換 · 金志元 · 全鎭洪 · 金應相

한국전기연구원

A Study on the Improvement of the Current Quality Using the Energy Storage System

Yeong-Han Chun, Ji-Won Kim, Jin-Hong Jeon and Eung-Sang Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

요 약

최근 전력수요가 증가하면서 전력저장시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 여러 가지 형태의 전력저장시스템 중에서 전지를 이용한 전력저장시스템이 현재까지 경제성이나 실용성 면에서 앞서있는 것으로 나타나 있다. 본 논문에서는 이러한 전지를 이용한 전력저장시스템의 운전알고리즘에 있어서 근래에 관심이 높아지고 있는 전력품질 문제를 고려한 운전 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 기본적으로 전력저장시스템은 전력계통에 병렬로 연결되어 운전되는데, 본 논문에서는 전력저장시스템의 기본 기능인 유효 전력공급 기능에 무효전력억제 및 고조파, 상불평형 전류 제거의 기능을 추가하여 사용할 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다.

Abstract — Recently, as the power demand grows, the concern on the Energy Storage System (ESS) is being increased. Among the various type of ESS, it is revealed that the Battery Energy Storage System (BESS) is the most economic and applicable. In this paper, the operating algorithm of the BESS including the solution of the power quality problem is studied. The BESS is connected to the power system in parallel, and the functions of the reactive power suppression and the harmonics and unbalanced current elimination, are added to the functions of the BESS. Through the computer simulations and experiments, the functions of the proposed algorithms are verified.

1. 서 론

근래 들어서 전력품질 문제에 대한 관심이 높아지면서 국내·외에서 전력품질 문제에 의한 피해 사례가 보고되고 있으며, 그에 대한 대책으로 능동전력 필터나 DVR(Dynamic Voltage Restorer) 등 각종 보상기기들에 대한 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}. 지금까지 알려진 바로는 미국의 경우 전력품질 문제에 의한 전체 산업에서의 손실이 연 \$ 26억에 이르고 있는 것으로 추정되며, 국내에서 최근에 보도된 바에 의하면 국내 반도체 공장에 대한 전력품질 문제에 의한 피해액은 연간 2,000억원에 이르는 것으로 나타나있다. 이렇게 경제적으로 막대한 손실을 초래하는 전력품질 문제는, 크게 수용가에서 사용하는 부하에 의해서 발생하는 전류품질 문제와 선로의 사고나 고장 등에 의해서 발생하는 전압품질 문제로 구

분할 수 있다^{[3][4]}. 전압품질의 문제는 직접 수용가에 공급되는 전압의 크기가 변동하는 경우로 기기의 재가동이나 고장등의 발생으로 인하여 수용가에서 피해를 입게된다. 전류품질 문제는 수용가에서 사용하는 부하에 의하여 발생하는 문제로 부하에 따라 고조파 전류, 상불평형 전류 그리고 무효전력이 발생하고 이것이 계통으로 유입되어 주변수용가의 기기 오동작이나 수명저하를 유발하거나 변압기의 수명단축 그리고 전력사용의 효율저하 등을 유발하게 된다. 한편 최근 들어 전력수요가 증가하면서 추가적인 발전소의 건설없이 이를 극복할 수 있는 방안의 하나로 전지를 이용한 전력저장시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 전력저장시스템은 기본적으로 전력계통에 병렬로 연결되어 유효전력을 공급하는 것이 주요 기능인데, 계통에 병렬로 연결되어 있다는 것은 전력계

통으로의 전류주입이 가능하다는 것을 의미하기 때문에 이를 이용하면 전류품질을 보상할 수 있는 가능성이 있다. 본 논문에서는 전류품질 문제에 대한 보상장치로 계통에 병렬로 연결된 전력저장시스템을 이용하여 전류를 주입함으로써 고조파 전류와 상 불평형 전류를 보상할 수 있는 전력저장장치의 기능에 대해서 연구하였다. 본 논문에서는 EMTDC/PSCAD를 이용한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

2. 시스템 구성 및 제어알고리즘

2-1. 시스템 구성

본 논문에서는 다루는 전력저장시스템의 구성은 split-capacitor 구조의 3상 인버터로 구성되며, 계통에 병렬로 연결된다. 전력저장시스템 제어를 위한 제어기로는 TI사의 TMS320C32-60 DSP를 이용하였다. 보상기기와 계통의 연계도를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 Vdc는 충전전이 가능한 전지로 구성되어 인버터의 DC link 전압을 공급하게 되며, L와 C는 인버터의 스위칭 노이즈를 억제하는 필터로 사용된다. 인버터의 DC link에서 캐패시터의 중간점을 이용한 것은 split-

capacitor 형태를 구성하여 각 상별 독립제어를 가능하게 한다. Fig. 1에서 Vsa, Vsb 및 Vsc는 각각 A, B, C상의 전원전압을 나타내며, isa, isb, isc는 전원측에서 공급하는 3상 전원전류, ica, icb, icc는 에너지 저장장치에서 공급하는 제어전류를 나타내고, iia, iib, iic는 부하에 공급되는 부하전류를 나타낸다. Fig. 1과 같은 구성에서 결국 부하전류는 전원전류와 제어전류의 합과 같아지므로 제어 전류를 조절함으로써 전원전류를 제어할 수 있게 된다.

2-2. 순시전력이론을 이용한 제어 알고리즘

본 논문에서 사용한 제어 알고리즘은 기존에 발표하였던 제어 알고리즘을 이용하였다^[4]. 다시 한번 제어 알고리즘에 대하여 정리하면 다음과 같다.

일반적인 3상 전력계통에서 순시전압 와 순시전류 를 식 (1)과 같이 나타냈을 때 순시유효전력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

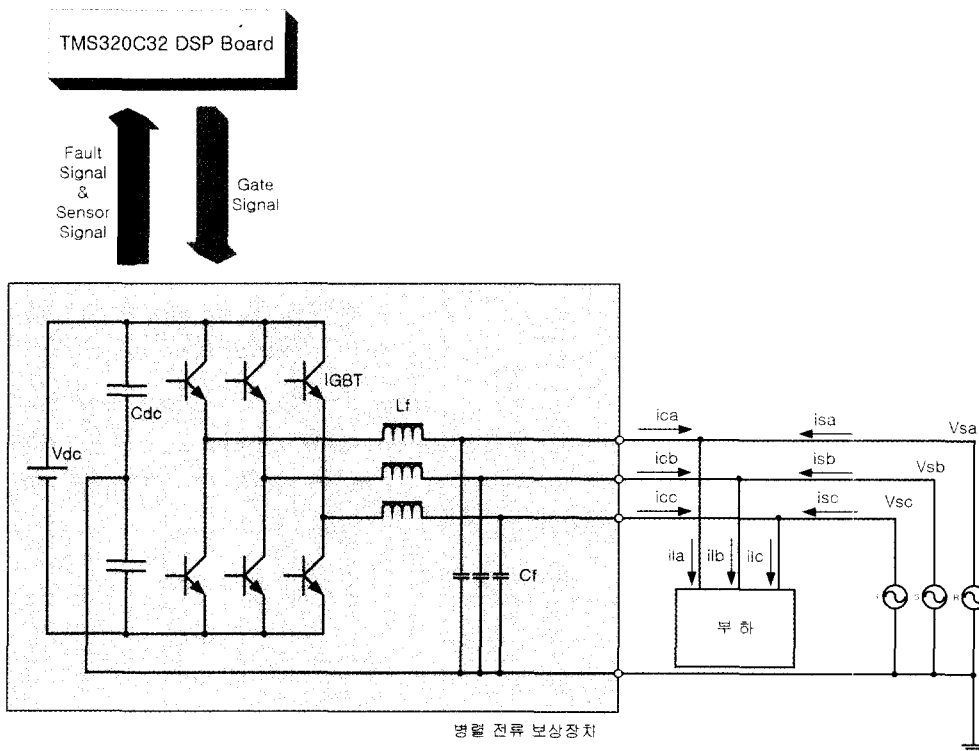


Fig. 1. Interconnection diagram to the power system of the BESS.

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2)$$

순시 유효전력이 식 (2)와 같을 때 순시 유효전류를 구하면 식 (3)과 같다^[5].

$$\bar{i}_p = \frac{p}{v \cdot v} \bar{v} \quad (3)$$

본 논문에서 제안된 무효전력 및 고조파 보상 그리고 상 불평형 보상이 가능한 제어 알고리즘은 부하에 상관없이 전원측에서는 항상 3상 모두 각 상의 전압과 동상이고 정현파인 전류만 공급하도록 하는 것이다. 즉, 임의의 부하에 대해서도 전원측은 항상 평형이고 일정한 유효전력만을 공급하도록 만드는데 목적이 있다. 식 (2)로 주어지는 순시 유효전력이 만약 상수가 된다면 식 (3)에 의해서 전원측에서 유효전력을 공급하기 위해 흘러야 하는 3상 전류($\bar{i}_{s,desire}$)를 얻을 수 있게 된다. 그리고, 부하전류(\bar{i}_L)에서 전원전류를 뺀 성분을 보상장치에서 공급하도록 제어하면 상기의 제어기능 구현이 가능하다. 따라서 이와 같은 기능을 구현하기 위해서 보상장치 장치에서 출력해야할 최종적인 전류 명령(\bar{i}_c^*)은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\bar{i}_c^* = \bar{i}_L - \bar{i}_{s,desire} \quad (4)$$

식 (2)에서 구한 유효전력값에서 저역통과 필터를 이용하면 유효전력의 DC 성분을 추출할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 DC 성분을 추출하기 위하여 차단주파수가 10 Hz이고 -40dB/decade roll-off를 갖는 저역통과 필터를 설계하였다. 설계된 저역통과 필터의 전달함수는 식 (5)와 같다.

$$LPF(s) = \frac{769.2}{s^2 + 50.8s + 769.2} \quad (5)$$

이렇게 하여 추출한 유효전력의 DC 성분을 P_{dc} 라고 하면, P_{dc} 를 전원측에서 공급하기 위하여 전원측에서 공급해줄기를 원하는 전류는 식 (6)이 된다.

$$\bar{i}_{s,desire-dc} = \frac{P_{dc}}{v \cdot v} \bar{v} \quad (6)$$

여기서 본 보상장치에서 공급해야할 전류명령은 식 (7)

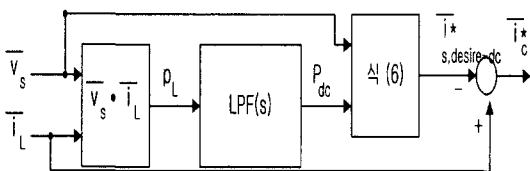


Fig. 2. Block diagram of the proposed algorithm.

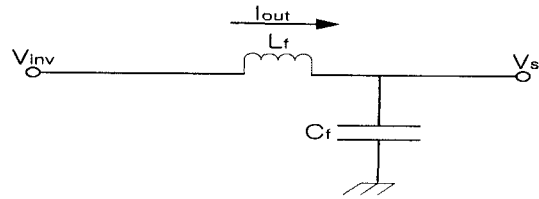


Fig. 3. Current control model.

과 같다.

$$\bar{i}_{c,desire}^* = \bar{i}_L - \bar{i}_{s,desire-dc} \quad (7)$$

본 논문에서 제안한 제어 알고리즘을 요약하여 블록도로 표시하면 Fig. 2와 같다.

2-3. 전류 제어기

본 논문에서 전류제어를 위한 모델은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 모델로부터 와의 관계식을 구하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{out}(s) = \frac{1}{sL_f} (V_{inv}(s) - V_s(s)) \quad (8)$$

식 (8)에서 C_f로는 스위칭 주파수에 해당하는 성분만 흐르고 이것은 인버터 출력전압과 인버터 출력 전류의 관계식에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 생략하였다. 식 (8)에서 인버터 출력 전압과 출력 전류의 관계는 적분기의 형태로 된다. 따라서 간단하게 P 제어기만으로 안정화 될 수 있으며, 계통전압은 측정 가능한 외란으로 생각할 수 있다. 전체적인 제어 루프는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

3. EMTDC/PSCAD를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 전력저장시스템의 기능을 확인하기 위하여 EMTDC/PSCAD를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5에 컴퓨터 시뮬레이션 회로도를 나타내었다.

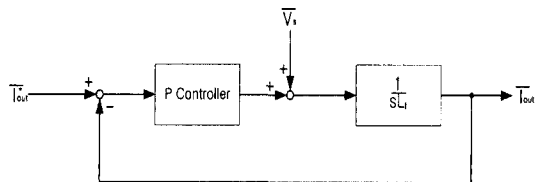


Fig. 4. Current control loop.

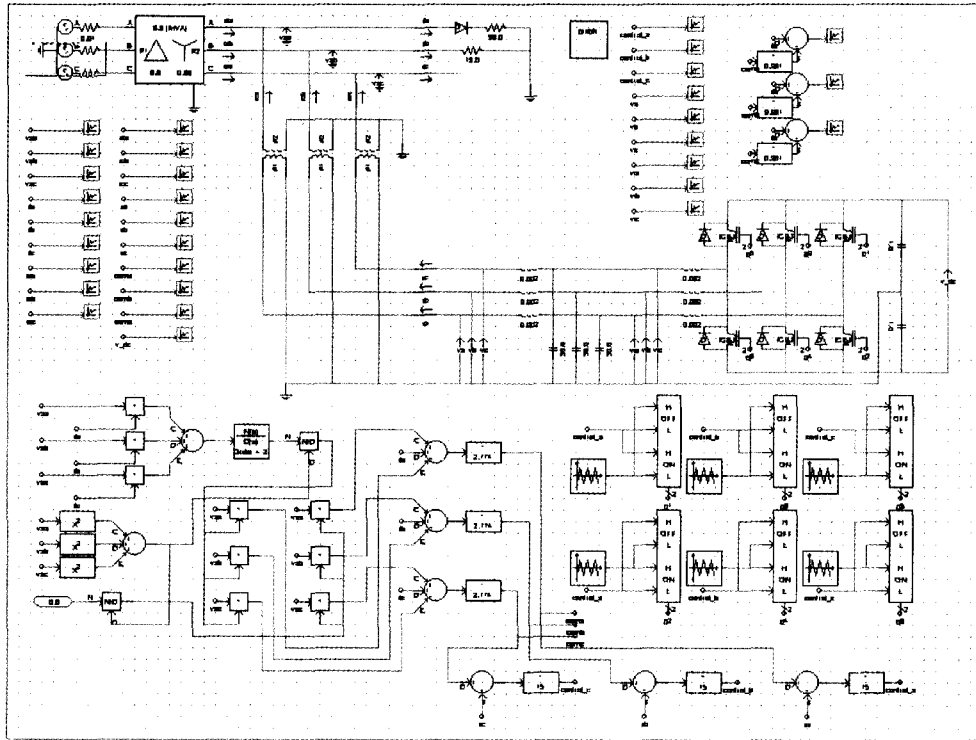


Fig. 5. Circuit diagram for computer simulation.

Fig. 5에서 보듯이 계통부하로는 A상에는 11[Ω] 저항 부하와 diode를 연결하고, B상에는 22[Ω]의 저항 부하를 그리고 C상에는 부하를 연결하지 않도록 하여, 계통 전류에 고조파 전류 및 상불평형 전류를 발생하도록 모의하였다. Fig. 6에 에너지저장시스템이 동작하지 않는 경우 계통에서 공급하는 3상전류 파형을 나타내었다.

Fig. 7에는 에너지저장시스템이 보상을 하는 경우 계

통전압과 계통전류의 파형을 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 현격한 불평형 전류와 다이오드의 정류에 의한 고조파 성분들이 크게 개선되어 계통에서 공급하는 전류가 현저하게 개선되었음을 알 수 있다. Fig. 7에서 보상장치가 동작하는 경우 약 0.15 [sec] 정도의 과도현상은 제어 알고리즘에 포함된 low pass filter의 응답에 기인한다.

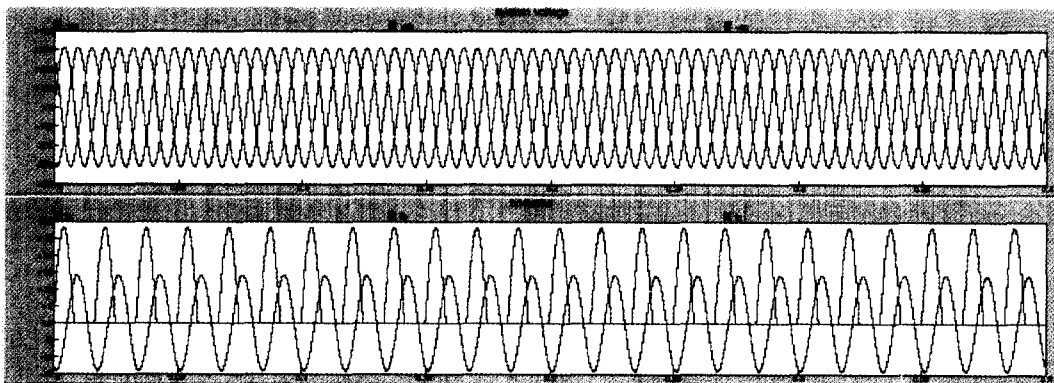


Fig. 6. System voltages & currents without compensating device.

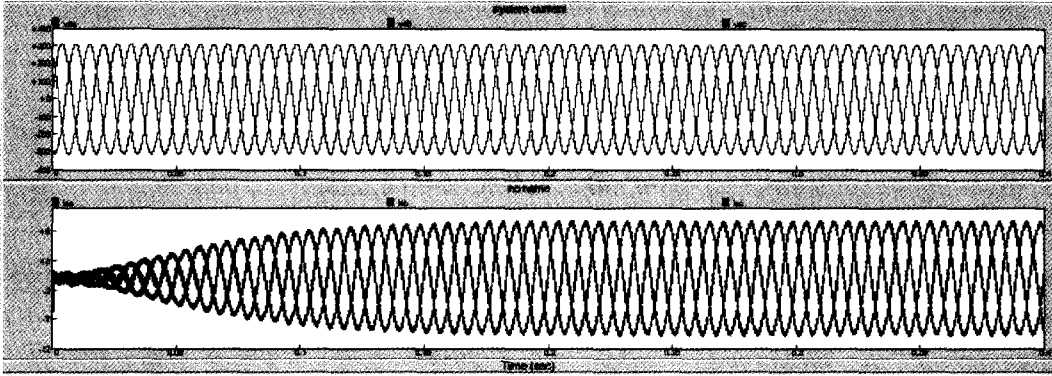


Fig. 7. System voltages & currents with compensating device.

4. 실험 및 결과

본 논문에서 에너지저장장치의 전류품질 보상기능을 확인하기 위하여 실제 실험 세트를 구성하였다. 구성된 실험 세트에서 인버터의 DC link 전원은 충방전이 가능한 battery에서 공급하도록 하였다. DSP C 언어를 이용하여 알고리즘을 제어기에 구현하였다. Battery의 전압의 크기는 12[V] cell을 30개 직렬 연결하여 360[V]로 설정하였으며, 계통전압은 80[V]로 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 8에 본 논문에서 구성한 실험 세트의 사진을 나타내었다. Fig. 8에서 왼쪽 cubicle은 DC link

전원으로 사용된 battery이고 오른쪽 cubicle은 보상장치와 제어기를 나타낸다.

본 실험에서 사용한 부하는 A상에 5.7[Ω] 저항부하를 연결하였고, B상에는 부하를 연결하지 않았으며 C상에는 2.8[Ω]의 저항부하를 싸이리스터를 통하여 연결하였다. Fig. 9에 에너지저장시스템이 동작하지 않는 경우 A상 계통전압과 3상 계통전류 파형을 나타내었다.

Fig. 10에는 에너지저장장치가 연결되어 제어를 수행하는 경우 3상 계통전류 파형을 나타내었다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 같이 보상장치를 연결하여 보상을 수행할 경우 고조

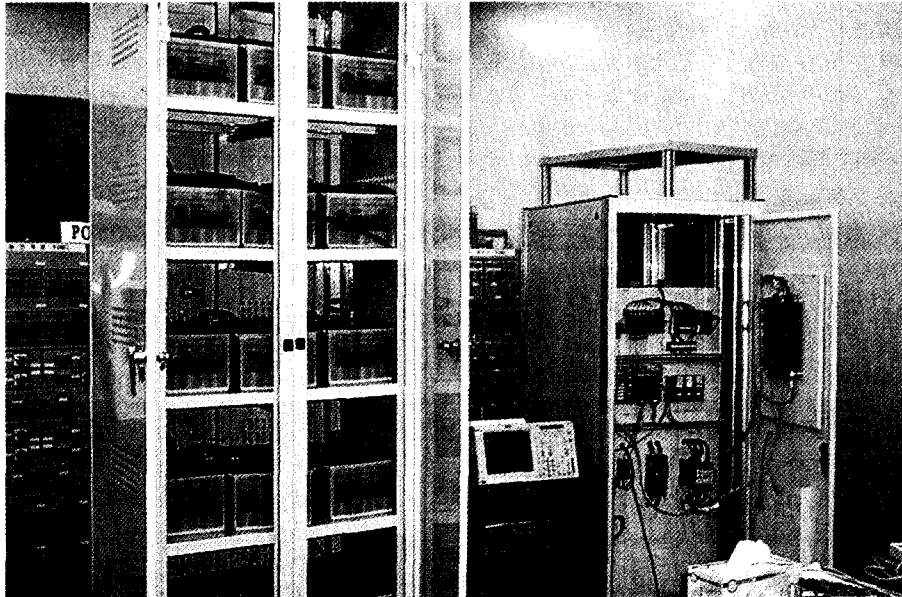


Fig. 8. Photograph of the experiment set.

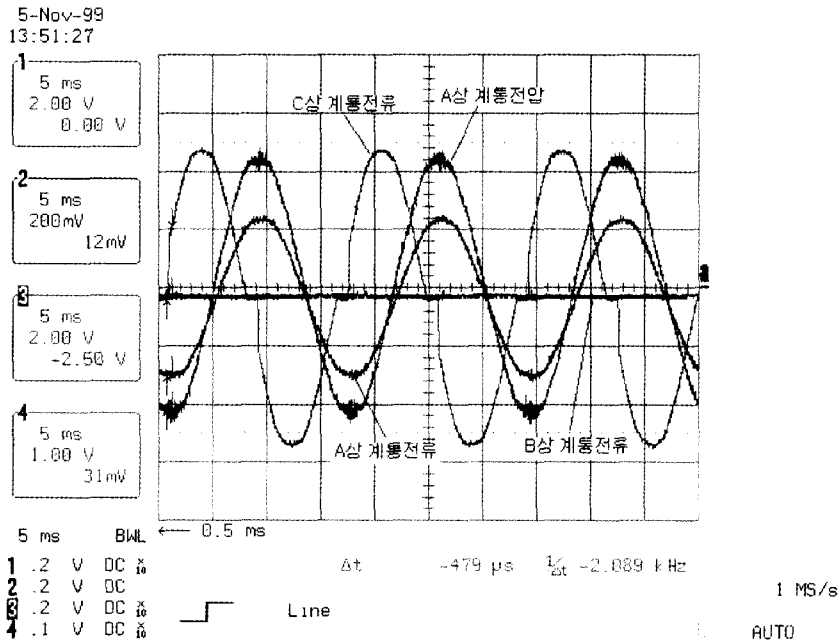


Fig. 9. 3-Phase system currents without compensating device (Voltage : 50 V/Div., Current : 10 A/Div.).

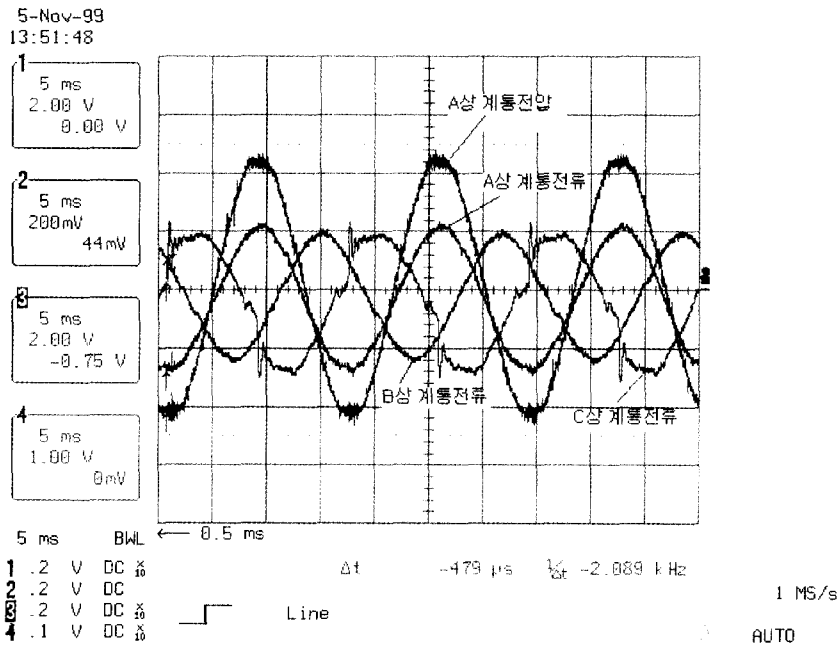


Fig. 10. 3-Phase system currents with compensating device (Voltage : 50 V/Div., Current : 10 A/Div.).

파 전류 및 상 불평형 전류를 현저하게 보상할 수 있는 것을 확인하였다.
다음은 무효전력이 발생하는 경우 이를 보상하는 기

능을 확인하기 위하여 A상에는 다이오드를 통하여 5.7[Ω] 저항부하를 연결하였고, B상에는 부하를 연결하지 않았으며 C상에는 10[mH]의 리액터와 2.8[Ω]의 저항부하를

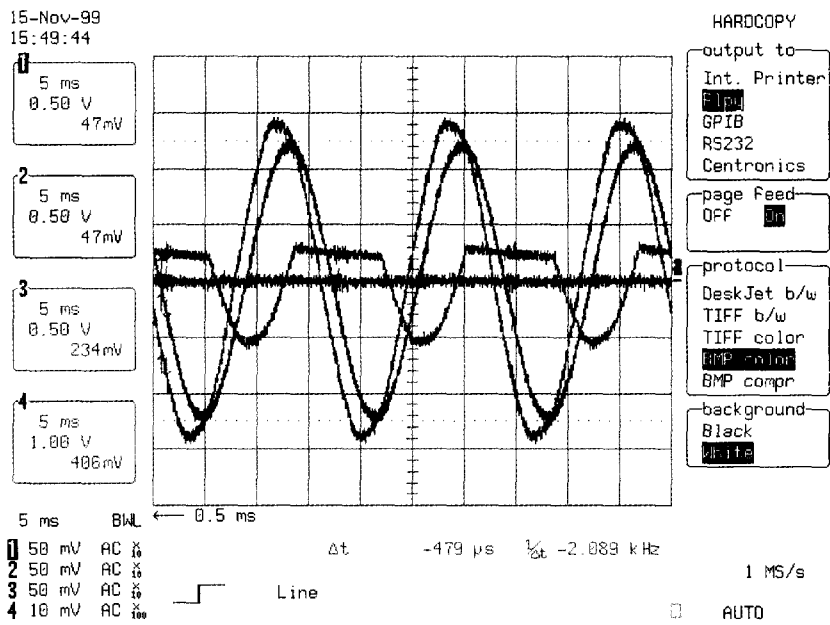


Fig. 11. 3-Phase current (BESS is not operating) (Voltage : 50 V/Div., Current : 10 A/Div.).

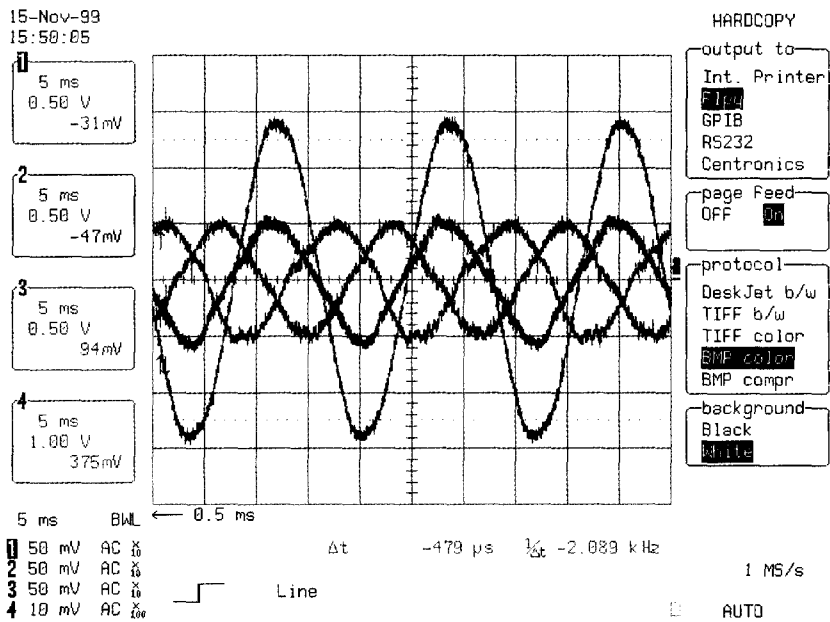


Fig. 12. 3-Phase current (BESS is operating) (Voltage : 50 V/Div., Current : 10 A/Div.).

연결하였다. 먼저 에너지저장장치가 동작하지 않는 경우 3상 전류파형을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 12에는 에너지 저장장치가 동작하는 경우 A상 전압파형과 3상 전류파형을 나타내었다.

지금까지의 실험결과를 통하여 계통에 병렬로 연결되는 에너지저장장치를 이용하여 고조파 및 상 불평형 전류제거와 무효전력을 억제하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통에 병렬로 연결되는 에너지저장시스템을 이용한 전류품질 개선에 대해서 연구하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 고조파 전류와 상 불평형 전류를 현격하게 제거하고 무효전력 또한 억제할 수 있음을 확인하였다. 추후의 과제로는 정확한 전류 제어 모델에 대한 연구와 이를 바탕으로 시스템의 성능을 개선시키는 것이다. 또한 전력품질 문제 중 전압품질 개선장치에 대한 연구를 진행하고 본 연구성과와 조합하여 종합적인 전류/전압 품질 개선 장치에 대한 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

1. Liaw, C.M., Chen, T.H. Chiang, S.J., Lee, C.M. and Wang, C.T.: "Small Battery Energy Storage System", IEE Proceedings-B, 140, 1 (1993).
2. Shiao, Y.S., Lin, C.E., Tsai, M.T. and Huang, C.L.: "Harmonic and Reactive Current Compensating using a Voltage Source Inverter in a Battery Energy Storage System", Electric Power System Research, 25, 25 (1992).
3. Chiang, S.J., Huang, S.C. and Liaw, C.M.: "Three Phase Multifunctional Battery Energy Storage System", IEE Proc.-Electr. Power Appl., 142(4), 275 (1995).
4. Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A.: "Instantaneous Reactive Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. on Industry Appl., IA-20, 3, May/June (1984).
5. Peng, F.Z. and Lai, J.H.: "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 45, 1, Feb. (1996).
6. Aredes, M., Hafner, J. and Heumann, K.: "Three-phase Four-wire Shunt Active Filter Control Strategies", IEEE Trans. on Power Electr. 12(2), March (1997).
7. Manitoba HVDC Research Center, "EMTDC Custom Models V3" (1998).
8. 金應相, 金志元: "에너지저장시스템의 운전제어 알고리즘에 관한 연구", 에너지공학회 논문지, 8(3), 470, (1999).