

순시전력 제어 이론을 이용한 유/무효전력의 독립제어에 관한 연구

論 文
48A-6-3

A Study on the Decoupled Control of the Active and Reactive Power using Instantaneous Power Control Theory

金應相* · 金志元** · 金永喆***
(Eung-Sang Kim · Ji-Won Kim · Young-Cheal Kim)

Abstract - In this paper, we propose the algorithm which can control active power and reactive power independently in Battery Energy Storage System. The proposed algorithm is based on the instantaneous power theory that the inner product of the voltage vector and current vector represents the active power and the cross product of those represents the reactive power, and it can control active power and reactive power independently. To verify the validity of the proposed algorithm, we make model of the real power system in the KERI and simulate this algorithm. As a result of this simulation, we verified that the proposed algorithm can control active power and reactive power independently.

Key Words : Independent control, Active power, Reactive power, Algorithm, 독립제어, 유효전력, 무효전력, 알고리즘

1. 서 론

매년 전력수요의 증가에 따라 주야간의 부하격차가 심화되고 있으며, 이로 인한 부하율이 현저히 저하하고 있다. 또한 국제적으로는 온실가스 배출억제 및 지구환경 보존문제로 화석연료의 사용에 제한을 받고 있는 시점에서 지속적인 발전소의 건설보다는 송변전설비의 유효이용을 위한 부하평준화의 노력이 필요한 시점이다.

부하평준화 문제 해결을 위한 기술로는 전력저장기술이 고려되며, 현재 실용화되어 있는 전력저장기술인 양수발전은 건설기간의 장기화, 입지조건의 제약, 건설비 증가, 송전손실 및 중소규모시스템 건설 곤란 등의 문제점이 있기 때문에 전력회사의 발전설비에서 발전된 전력을 심야시간대에 직교변환장치를 이용하여 직류로 변환한 후 2차전지에 저장하였다가 주간 최대 부하시나 필요시에 다시 교류로 변환하여 전력을 공급하는 전지전력저장시스템이 선진국은 물론 국내에서도 오래전부터 개발되어 왔다[1]. 이러한 전력저장시스템의 주된 목적은 유효전력을 부하에 공급하여 점두 부하를 삭감하는 것이지만 또 하나의 기능으로 무효전력 제어를 할 수도 있다. 기존의 유효전력 제어와 무효전력 제어는 각각 출력전압의 위상차와 크기에 의해서 제어해 왔었다[2].

또다른 유효전력과 무효전력의 제어방법으로 회전하는 d-q축을 이용하여 3상전압과 3상전류를 d 성분과 q성분으

로 변환하여 각각 P와 Q의 제어하는 독립제어 방법이 있었다[3]. 그러나 이 방법 역시 여러 가지 변환을 통하기 때문에 계산량이 많아서 실제 시스템에 실시간 제어로 적용하기에는 어렵다[4]. 따라서 본 논문에서는 계산이 간단하고 유/무효전력 제어명령에 따라서 서로 독립적인 식을 갖는 벡터의 외적과 내적을 이용한[5] 비간섭 독립제어 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해서 한국전기연구소내 전력저장시스템실의 실제통을 대상으로 모델링을 수행하고 MATLAB 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 유효전력과 무효전력이 독립적으로 제어됨을 확인하고자 한다.

2. 유/무효전력 독립제어 알고리즘

2.1 일반적인 제어방식

전력저장시스템을 전력계통과 병렬로 연계하여 부하에 유효전력과 무효전력을 동시에 공급한다고 가정할 때 간단한 계통도를 그리면 아래 그림 1과 같이 표현 할 수 있다. 이때 계통전압 \bar{v}_s 와 전력저장시스템의 출력전압 \bar{v}_c 의 위상차를 δ 라고 하면 전력저장 시스템에서 계통으로 공급하는 유효전력 P와 무효전력 Q는 각각 식 (1) 및 (2)로 표현 할 수 있다.

$$P = \frac{|V_s||V_c|}{Z} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{Z} (|V_c|^2 - |V_c||V_s| \cos \delta) \quad (2)$$

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 前任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 研究員

*** 正 會 員 : 雙龍重工業研究所 研究員

接受日字 : 1998年 11月 20日

最終完了 : 1999年 5月 10日

식 (1)과 (2)에서 δ 의 변화는 매우 작기 때문에 $\sin \delta \rightarrow \delta$, $\cos \delta \rightarrow 1$ 로 치환할 수 있다. 따라서 V_c 를 일정하게 하고 δ 를 조정함으로써 P를 제어할 수 있고, V_c 의 크기를 조정함으로써 Q를 제어할 수 있다. 그러나 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 P와 Q항에 모두 V_c 와 δ 가 변수로 들어 있으므로 완전한 P와 Q의 독립제어는 불가능하게 된다.

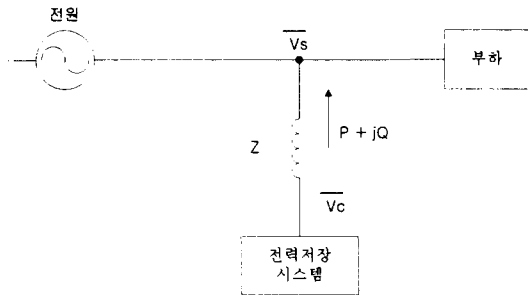


그림 1. 전력저장시스템 계통연계 구성도
Fig 1. Block diagram of the BESS inter-connected to the power system

2.2 비간섭 독립제어 알고리즘

부하에 공급되는 유효전력이 P_L , 무효전력 벡터가 $\overline{Q_L}$ 이고 계통전압을 $\overline{v_s} = [v_a \ v_b \ v_c]$ 라고 하면, 유효전류 벡터와 무효전류 벡터를 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다[4]. 식 (3)과 (4)에서 \cdot 는 벡터의 내적을 나타낸 것이고 \times 는 벡터의 외적을 나타낸 것이다.

$$\overline{i_{P_i}} = \frac{P_L}{\overline{v_s} \cdot \overline{v_s}} \overline{v_s} \quad (3)$$

$$\overline{i_{Q_i}} = \frac{\overline{Q_L} \times \overline{v_s}}{\overline{v_s} \cdot \overline{v_s}} \quad (4)$$

이때 전력저장시스템에서 부하로 공급하고자 하는 유효전력 명령과 무효전력 명령을 $P_{command}$ 와 $Q_{command}$ 라고 하면, $P_{command}$ 를 공급하기 위해서 전력저장시스템에서 공급해야 하는 유효전류 명령벡터는 일반적인 식 (3)을 이용하여 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{i_{P_i}} = \frac{P_{command}}{\overline{v_s} \cdot \overline{v_s}} \overline{v_s} = \frac{P_{command}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

마찬가지로 무효전력 명령이 $Q_{command}$ 라면 식 (6)과 같은 무효전력 벡터로부터 $Q_{command}$ 와 무효전력 벡터의 요소와의 관계를 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{Q_{command}} = \begin{bmatrix} Q_{command, a} \\ Q_{command, b} \\ Q_{command, c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Q_{command} = \sqrt{Q_{command, a}^2 + Q_{command, b}^2 + Q_{command, c}^2} \quad (7)$$

식 (7)에서 평형인 부하를 가정하면 전원공급장치측에서 3상 평형을 이루기 위해서는 무효전력 벡터의 각 요소의 제곱항들이 모두 같은 값을 갖게된다. 그러므로, 식 (7)을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$where, k = \frac{Q_{command}}{Q_{command, a}} = Q_{command, b} = Q_{command, c} \quad (8)$$

$Q_{command}$ 의 무효전력을 공급하기 위한 무효전류에 관한 식 (4)를 벡터의 외적을 이용하여 $\overline{Q} \times \overline{v_s}$ 를 전개하여 요소별로 표현하면 식 (9)와 같다. 식 (9)에서 $|$ 는 행렬의 행렬식을 나타낸다.

$$\overline{Q} \times \overline{v_s} = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | Q_b \ v_b \\ Q_c \ v_c \\ Q_a \ v_a | \\ | Q_a \ v_a \\ Q_b \ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_b v_c - Q_c v_b \\ Q_c v_a - Q_a v_c \\ Q_a v_b - Q_b v_a \end{bmatrix} \quad (9)$$

따라서, $Q_{command}$ 가 무효전력 명령일 때, 식 (4)와 식 (8) 그리고 식 (9)를 이용하여 무효전력에 관련되는 전류 벡터를 구하면 식 (10)과 같다.

$$\overline{i_{Q_i}} = \frac{Q_{command}}{\sqrt{3}(v_a^2 + v_b^2 + v_c^2)} \begin{bmatrix} v_c - v_b \\ v_a - v_c \\ v_b - v_a \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (5)와 식 (10)으로부터 유효전력 제어명령과 무효전력 제어명령이 각각 $P_{command}$ 와 $Q_{command}$ 인 경우 각 명령에 해당하는 유효전력과 무효전력을 출력하기 위하여 공급해야 하는 전류 명령은 결국 각각 $P_{command}$ 와 $Q_{command}$ 만에 의해서 결정되고 v_a, v_b, v_c 는 순시적으로 유효전류 명령과 무효전류 명령을 만드는데 있어서 변수가 아닌 상수의 역할을 하기 때문에 서로 독립적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이러한 알고리즘과 MATLAB 프로그램을 이용하여 계통연계 운전시의 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

3. 시뮬레이션

본 절에서는 그림 2와 같이 전기연구소내 전력저장시스템실의 실제통도를 모델링하여 이 계통에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

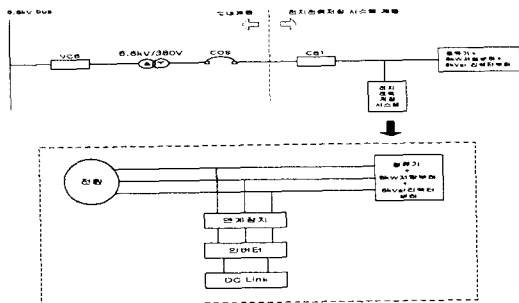


그림 2. 전기연구소내 전력저장시스템실의 모델 계통도
Fig 2. Power system model of the BESS room at KERI

계통에 병렬로 연계되어 운전되는 전력저장시스템에서 부하는 3상 정류기 부하를 가정하였으며 부하의 용량은 8kW의 저항부하와 6kVar의 리액터 부하를 가정하였다. 또한, 전력저장시스템의 용량은 20kVA로 부하의 유/무효전력의 용량을 충분히 공급할 수 있는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션을 위한 프로그램으로는 MATLAB/Simulink를 이용하였으며, 무효전력 제어, 유효전력 제어 그리고 유/무효전력 동시제어의 세가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 그림 3에 3상 전원전압과 3상 부하전류의 파형을 나타내었으며, 그림 4에는 부하에 공급되는 유효전력과 무효전력을 나타내었다.

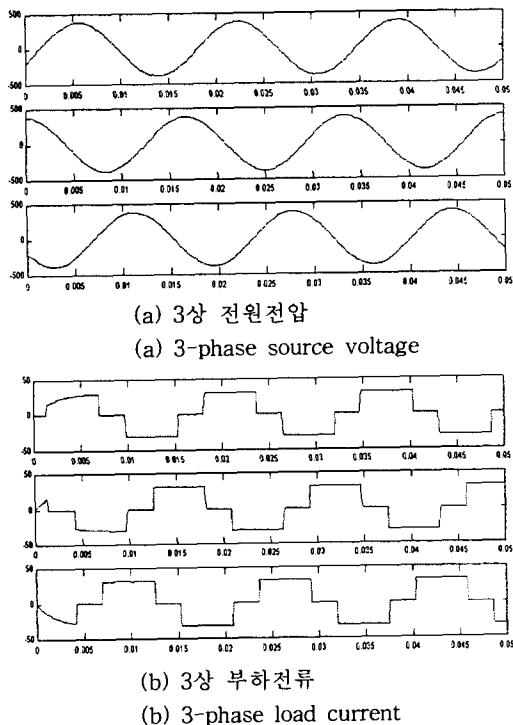


그림 3. 3상 전원전압과 3상 부하전류
Fig 3. 3-phase source voltage and load current

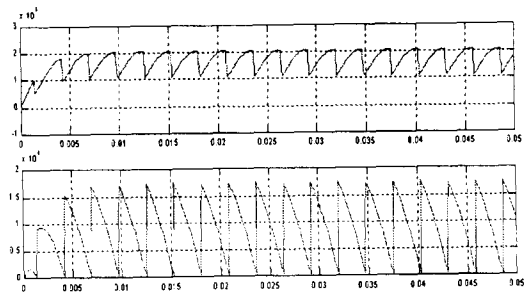


그림 4. 부하에 공급되는 유효전력(上)과 무효전력(下)
Fig 4. Active power(up) and reactive power(down) supplied to the load

3.1 무효전력 제어

전력저장시스템에서 공급할 유효전력 명령을 0으로 하고 보상전 전원측에서 공급하고 있던 모든 무효전력분을 전력저장시스템에서 보상하기 위해 공급한다고 가정했을 경우 보상된 유효전력과 무효전력을 그림 5에 나타내었다. 그림 6에는 이때 전력저장 시스템에서의 3상 출력 전류를 나타내었다.

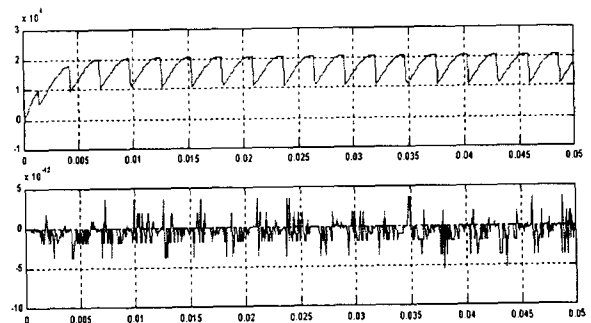


그림 5. 무효전력만 제어하는 경우 전원측에서 공급하는 유효전력(上)과 무효전력(下)
Fig 5. Active power(up) and reactive power(down) supplied from the source when only the reactive power is controlled

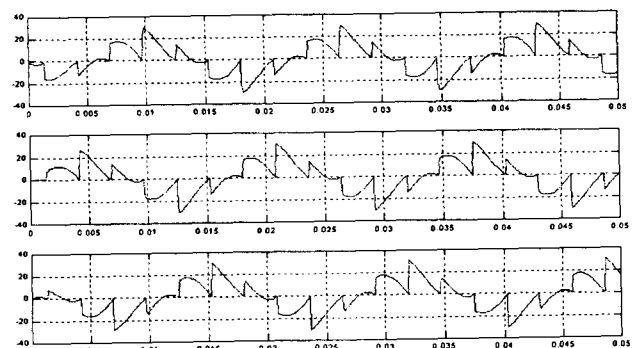


그림 6. 무효전력만을 제어했을 경우 전력저장시스템의 출력전류
Fig 6. Output current of the BESS when only the reactive power is controlled

그림 5에서 알 수 있듯이 무효전력만 제어했을 경우 전원측에서 공급하는 유효전력은 변하지 않고 전원측에서 공급하는 무효전력만이 거의 0이 되는 것을 알 수 있다. 즉, 유효전력에는 아무런 영향이 없이 무효전력만 제어됨을 알 수 있다.

3.2 유효전력 제어

여기서는 보상전 부하에 공급되고 있던 유효전력을 모두 전력저장시스템에서 공급하고 무효전력 명령은 0으로 했을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 7에서는 유효전력만을 제어했을 경우 전원측에서 공급하는 유효전력과 무효전력을 나타내었고 그림 8에서는 이때 전력저장시스템의 3상 출력전류 파형을 나타내었다.

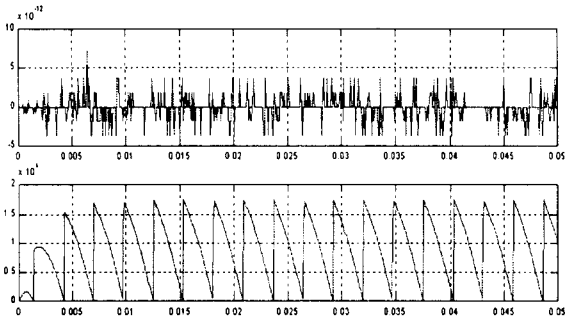


그림 7. 유효전력만을 제어했을 경우 전원측에서 공급하는 유효전력(上)과 무효전력(下)
 Fig 7. Active power(up) and reactive power(down) supplied from the source when only the active power is controlled

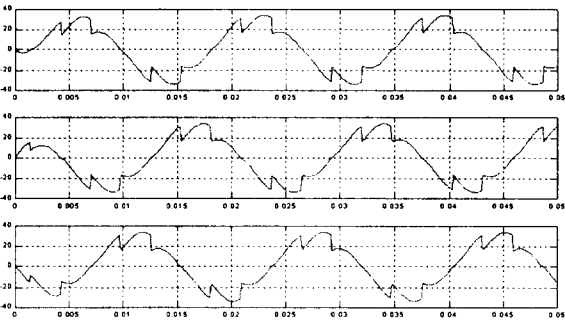


그림 8. 유효전력만을 제어했을 경우 전력저장시스템의 출력전류
 Fig 8. Output current of the BESS when only the active power is controlled

그림 7에서 알 수 있듯이 유효전력만 제어하는 경우에도 역시 전원에서 공급하는 무효전력에는 변화가 없고 유효전력만 거의 0이 되는 것을 알 수 있다.

3.3 유/무효전력 동시제어

그림 9에는 보상전 유효전력과 무효전력의 50%를 명령으로 주었을 경우의 결과를 나타내었고 그림 10은 이때의 전력저장시스템 출력전류 파형을 나타내었다.

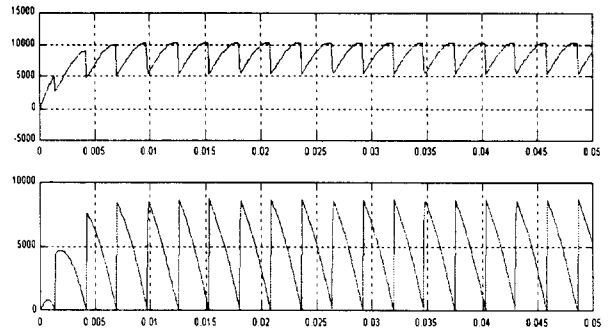


그림 8. 유/무효전력 동시제어시 전원측에서 공급하는 유효전력(上)과 무효전력(下)
 Fig 8. Active power(up) and reactive power(down) supplied from the source when the active and reactive power is controlled simultaneously

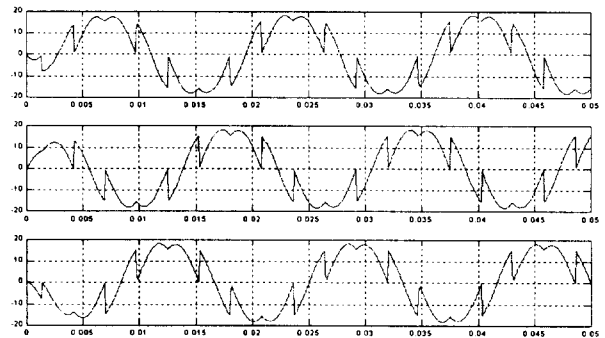


그림 9. 유/무효전력 동시제어시 전력저장시스템의 출력전류
 Fig 9. Output current of the BESS when the active and reactive power is controlled simultaneously

그림 9에서도 역시 유효전력과 무효전력은 서로 간섭없이 독립적으로 제어되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 선진국을 비롯하여 국내에서도 개발중인 전력저장시스템에 적용될 수 있는 순시전력 이론을 이용한 유/무효전력의 비간섭 독립제어에 대한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 MATLAB 프로그램을 이용하여 유효전력만을 제어했을 경우, 무효전력만을 제어했을 경우 그리고 유/무효전력을 동시에 제어했을 경우로 나누어 각각의 경우에 대해서 서로가 전혀 영향을 주지 않고 제어됨을 확인하였다. 부하평준화를 위한 기존의 시스템은 주로 유효전력의 제어에만 중점을 두었으나 전력저장시스템의 개발이 진행되면서 전기철도, 전기통신 등 활용분야가 다양해지면서 유효전력 뿐만 아니라 무효전력의 제어도 필요하게 되었으며, 이러한 경우에 서로의 비간섭 독립제어의 활용도가 높으리라 판단된다. 추후 다양한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안된 알고리즘을 실제 시스템에 적용하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] C.M. Liaw, T.H. Chen, S.J. Chiang, C.M. Lee, C.T. Wang, "Small Battery Energy Storage System", IEE Proc.-B, Vol. 140, No. 1, Jan. 1993

[2] T. Furuhashi, S. Okuma, Y. Uchikawa, "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power", IEEE Trans. on Indust. Electron. Vol. 37, No. 1, Feb. 1990

[3] G. Bisciglia, P. Cesario, L. Puglisi, G. Sciutto, "Lead-Acid Batteries Energy Storage System for Decoupled Control of Real and Reactive Power", Proc. of Power Quality, Paris, pp56-66. Nov. 1990.

[4] F.Z. Peng, J.S. Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems", IEEE Trans. on Instrum. and Measur., Vol. 45, No. 1, Feb. 1996

[5] Takeshi Furuhashi et. al, "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 1, Feb. 1990.

저 자 소 개



김응상(金應相)
 1962년 6월 21일 생. 1988년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1991년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~현재 한국전기연구소. 배전연구팀장

Tel : 0551-280-1330
 E-mail : eskim@keri.re.kr



김영철(金永喆)
 1964년 10월 26일생. 1991년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 경남대학교 대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 쌍용중공업연구소/태양광 발전담당

Tel : 0551-280-0152
 E-mail : kimyc@mail.sshi.co.kr



김지원(金志元)
 1971년 9월 20일 생. 1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국전기연구소 연구원

Tel : 0551-280-1335
 E-mail : jwkim@keri.re.kr