

DVR을 이용한 전력품질 개선

Power Quality Improvement using DVR

김 성 환*

Seong-Hwan Kim*

Abstract

DVR is a device that compensates for voltage fluctuations in distribution lines and is generally used in combination with a device that compensates reactive power and improve power factor. Such a coupling compensator has the disadvantage of being relatively difficult to control and bulky. In this paper, mathematical analysis of the maximum magnitude of the compensation voltage, phase angle, compensable reactive power and active power was performed in order to simultaneously compensate the reactive power and voltage fluctuation of the distribution line by applying the power angle control method of the DVR. A control algorithm for charging active power to the battery and supplying stored energy when the voltage is changed was developed and the results were confirmed through Matlab simulation.

요 약

DVR은 배전선로의 전압 변동을 보상하는 장치로 일반적으로 계통의 무효전력 보상, 역률개선 문제를 해결하는 장치와 결합하여 사용된다. 이러한 결합보상기기는 상대적으로 제어에 어렵고 부피가 커지는 단점을 갖는다. 본 논문에서는 DVR의 전력위상제어(Power Angle Control)방법을 적용하여 부가적인 보상기기의 결합이 없이 DVR 단독으로 배전선로의 무효전력과 전압변동을 동시에 보상하기 위해 보상 전압의 최대 크기와, 위상, 보상 가능한 무효전력 및 유효전력에 대한 수학적 해석을 수행하였다. 유효전력을 배터리에 충전하고 전압 변동시 저장된 에너지를 공급하기 위한 제어알고리즘을 개발하고 Matlab 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하였다.

Key words : DVR, Power Quality, Reactive Power, Power angle control, Voltage variation

1. 서론

국내 배전계통의 현황은 다수의 분산전원이 연계되면서 배전계통의 전압변동, 고조파 발생 등 전력품질 보상에 대한 다양한 노력을 기울이고 있으며 SEMI-F47 등 엄격한 내성기준을 통하여 전력품질에 민감한 부하들에 대한 사고를 방지하고 있다. 그뿐만 아니라 DVR(Dynamic Voltage Restorer),

STATCOM 등 전력 품질 보상 기기들이 적용되고, 다양한 제어 방법들에 대한 연구가 진행되고 있다[1]-[4].

전력품질 보상 기기 중 대표적인 전압 보상 기기인 DVR에 위상각 제어를 적용하면 계통 전압변동에 대한 전압 보상과 동시에 무효전력 보상이 가능해져 배전계통의 전압안정도 향상과 양질의 전력품질을 공급할 수 있다. 하지만 DVR의 위상각

* Dept. of Electrical & Control Engineering, Mokpo National University

★ Corresponding author

E-mail : shkim@mokpo.ac.kr, Tel : +82-61-450-2753

※ Acknowledgment

This paper was supported by Research Funds of Mokpo National University in 2020

Manuscript received Aug. 19, 2021; revised Sep. 23, 2021; accepted Sep. 24, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제어는 순간전압상승 및 계통 정상 상태에서 무효 전력을 보상할 경우 선로에 유효전력이 증가하게 되고 추가적인 DC전원이 필수적으로 구성되어야 한다.

본 논문에서는 위상각 제어를 적용한 DVR과 양방향 DC-DC컨버터와 배터리를 연계하는 시스템을 구성하고, 유효전력을 계통의 상태에 따라 DVR을 통해 계통으로 공급하거나 ESS에 충전되도록 하여 DVR 단일기기만으로 무효전력보상 및 전압보상이 가능하도록 하였다. 이를 위해 DVR 발생 또는 소모 유효전력에 따라 DVR 전압제어기와 배터리 충·방전 전류제어기를 설계하여 계통 상태에 따른 전력전달 지령을 생성하였으며, 설계한 제어기 및 연계시스템은 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해 성능을 확인하였다.

II. 본론

1. DVR 구성 및 동작원리

DVR은 그림 1과 같이 구성되어 있으며 계통의 순간 전압 강하 또는 순간전압 상승과 같은 전압변동이 발생하면 계통에 연결된 직렬변압기를 통해 보상전압을 주입함으로써 부하 전압을 일정하게 유지하는 목적으로 사용된다.

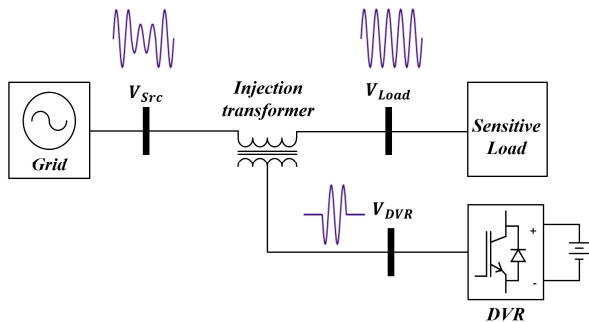


Fig. 1. DVR circuit operation principle.
그림 1. DVR 구성 및 동작원리

일반적으로 DVR에서 계통의 전압변동을 보상하기 위한 방법은 그림 2의 벡터도에 나타난 바와 같이 3가지로 구성된다. 이 중에서 가장 일반적으로 사용되는 방법은 전압진폭최적화 보상이며 전압변동이 발생한 계통전압과 DVR의 보상전압 위상을 일치시켜 단순 전압변동 크기에 대한 보상만을 수

행함으로써, 제어가 간단하고 상대적으로 적은 양의 보상전압이 주입된다는 장점이 존재한다. 전압품질 최적화 보상방법은 부하전압을 전압변동 이전의 크기와 위상으로 보상해주는 방법으로, 가장 큰 보상전압이 필요하며 부하전압의 위상에 대한 정보를 얻어야 한다. 마지막으로 에너지 최적화 보상방법은 부하전류와 90° 위상차를 갖는 보상전압을 주입하여 위상에 대한 일정 부분 보상을 수행하며 DVR 보상 시 소모되는 에너지를 최소화하는 방법이다.

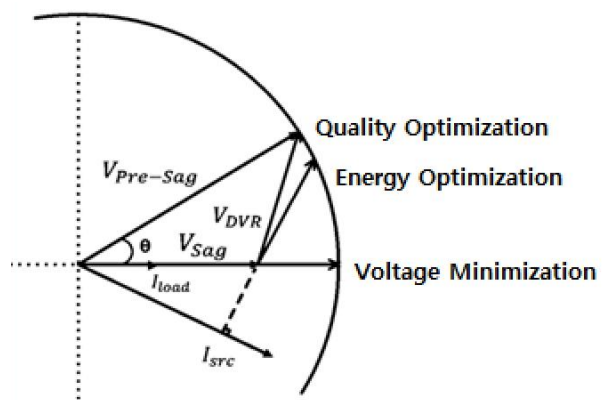


Fig. 2. DVR Compensation Voltage.
그림 2. DVR 보상전압

2. DVR의 전력위상제어(PAC)

DVR은 부하 측의 Sag, Swell, Flicker 등의 전압변동에 대한 보상이 주로 이루어지기 때문에 계통의 무효전력 보상, 역률개선 및 전류 고조파 보상의 문제를 해결하는 보상기와 결합하여 사용되고 있다. 하지만 이러한 결합 보상기의 경우 상대적으로 제어가 어렵고 부피가 커지는 단점을 갖는다. DVR의 전력 위상 제어(Power Angle Control : PAC) 방법은 DVR 기기만을 사용하여 전압 보상과 무효전력 보상이 가능하지만 선로의 유효전력이 증가하여 DVR에서 소모되는 단점이 있다.

그림 3는 전력위상제어(PAC)의 벡터도를 나타낸다. V_L , I_L 은 보상이 없을 시 δ 만큼의 위상차를 갖는 부하 전압과 부하 전류를 나타낸다. PAC 방법은 부하 전류 I_L' 이 계통 전압 V_S 와 동상이 되도록 부하전압 V_L 을 V_L' 로 위상을 이동시켜 무효 전력을 보상할 수 있다.

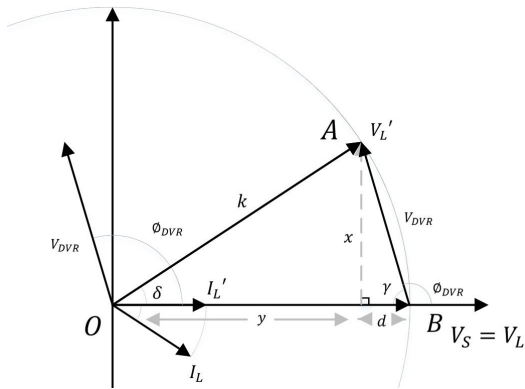


Fig. 3. PAC Vector Diagram.
그림 3. PAC 벡터도

이때 보상전압의 크기와 위상각은 벡터도에서 다음과 같이 구해진다.

$$|V_{DVR}| = \sqrt{x^2 + d^2} = k \sqrt{2} \sqrt{1 - \cos\delta} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \angle\gamma &= \tan^{-1}\left(\frac{x}{z}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{\sin\delta}{1 - \cos\delta}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 보상 전압의 크기와 위상각을 구하고 변압기를 통해 보상전압을 계통으로 주입하여 무효 전력을 보상할 수 있지만, 부하 전류 I_L' 이 계통 전압 V_S 와 동상이 되도록 부하 전압의 위상을 이동시키게 되면 유효전력이 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 PAC 방법을 DVR에 사용하는 경우 무효전력에 대한 보상과 유효전력량의 증가를 고려해야 한다. 이때 DVR에서 보상되는 무효전력과 증가하는 유효전력은 다음 식과 같이 구해진다.

$$Q_{DVR} = V_L I_L \sin\delta, \quad P_{DVR} = V_L I_L (1 - \cos\delta) \quad (3)$$

3. 배터리 연계 DVR 시스템 제어기 설계

실제 계통에서 DVR의 PAC 방법을 적용할 경우 DVR에서 계통으로 주입 할 수 있는 보상 전압의 최대 크기를 고려하여 DVR의 정격에 맞는 최대 보상가능 위상각 δ_{max} 를 해석하여야 한다.

그림 4에서 DVR의 최대 보상 가능 전압의 크기를 d_{max} 라고 하면, PAC 보상을 통해 부하 전압을 V_L' 로 만들기 위해 DVR의 주입 전압은 d_{max} 보다 커야 한다. 예를 들어 DVR이 0.3pu의 전압 변동을 보상하기 위해서는 DVR의 정격 전압이 0.3pu 보

다 커야 하고 이에 따라 DVR의 정격에 따른 최대 보상 가능 전압의 위상과 유·무효 전력이 결정 된다.

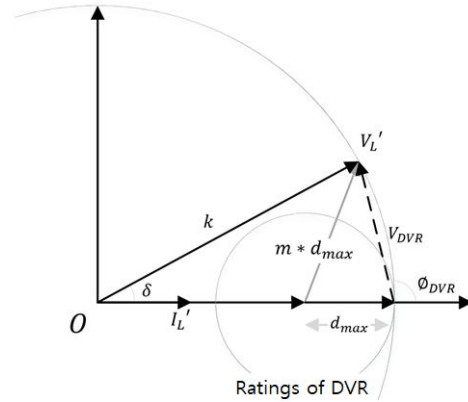


Fig. 4. Ratings of DVR and voltage.
그림 4. DVR 정격 및 보상전압

그림 4의 벡터도에서 최대보상가능한 위상각과 최대보상 유·무효전력을 구하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{max} = \cos^{-1}\left(1 - \frac{(m d_{max})^2}{2}\right) \quad (4)$$

$$P_{DVR_max} = V_L I_L (d_{max} - \cos\delta_{max}) \quad (5)$$

$$Q_{DVR_max} = V_L I_L \sin(\delta_{max}) \quad (6)$$

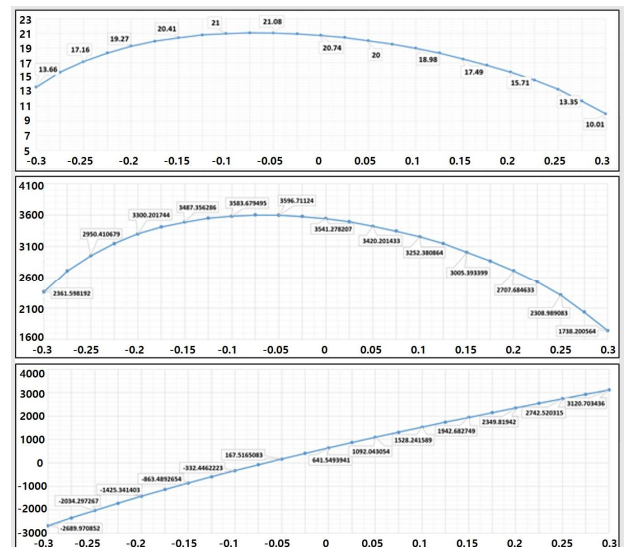


Fig. 5. Maximum power angle, reactive power, active power.
그림 5. 보상가능위상, 보상무효전력, 유효전력

그림 5는 DVR의 최대보상전압변동을 30%로 하고, DVR 정격을 최대보상전압의 1.2배로 하였을 경우, 계통전압변동에 따른 보상가능위상, 보상무

효전력, 유효전력의 그래프이다.

전압 Sag 발생시 유효전력이 계통으로 공급되고, 기본 보상과 Swell 발생시에는 유효전력이 DVR 쪽으로 공급되는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 6과 같이 DVR 쪽으로 공급되는 유효전력을 저장하여 활용할 수 있도록 양방향 DC-DC 컨버터와 배터리를 연계한 DVR 시스템을 구성하였다.

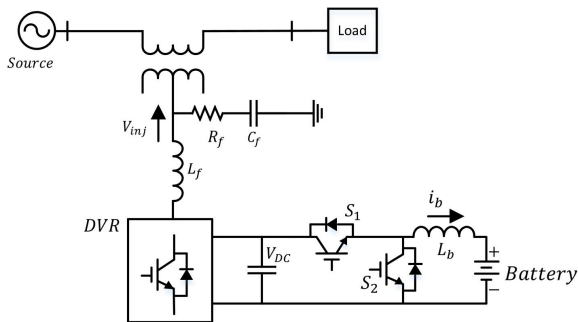


Fig. 6. DVR with bidirectional DC-DC converter and battery. 그림 6. 양방향 DC-DC 컨버터 및 배터리 연계 DVR 시스템

그림 7은 DVR과 DC-Link를 공유하는 양방향 DC-DC 컨버터의 제어기 구성도이다. DC 링크 전압을 일정하게 유지시키기 위한 전압 제어기의 출력에 충·방전 유효전력에 대한 전류량을 피드포워드 하여 전류 기준치를 생성한다. 전류 제어기의 출력은 삼각파와 비교하여 양방향 DC-DC 컨버터의 스위칭 소자에 PWM 입력으로 사용된다.

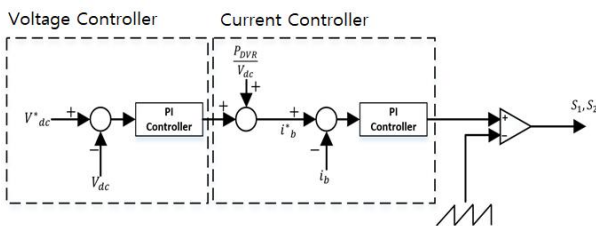


Fig. 7. Controller of bidirectional DC-DC converter. 그림 7. 양방향 DC-DC 컨버터 제어기

III. 시뮬레이션

제안된 시스템의 성능을 확인하기 위하여 Matlab/Simulink SimPowerSystem을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8은 제안된 시스템의 Matlab/Simulink 모델이다. DVR의 스위칭 주파수는 10kHz, 시뮬레이션의 Time step은 5us이고, 제어기는 30ms

주기로 동작한다. 배터리 정격용량은 100Ah이며 초기 SOC는 80%로 가정하였다.

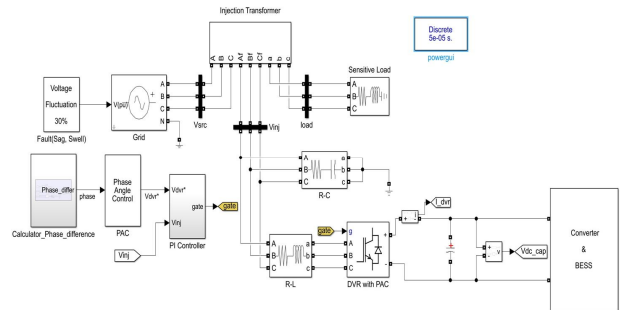


Fig. 8. Matlab/Simulink Model of proposed system. 그림 8. 제안된 시스템의 Matlab/Simulink 모델

설계된 모델을 통해 계통 상태에 따라 DVR의 전압변동 보상과 무효전력 보상 수행능력 및 배터리 충방전 성능을 확인하여 제안된 연계시스템의 동작 및 제어기 성능을 검증한다. 계통의 상태 변화를 모의하기 위하여 발전기에서 전압 Sag와 Swell이 각각 30%씩 발생하도록 하였으며, 부하 모델은 DVR의 PAC 성능을 확인하기 위하여 리액턴스 성분을 포함한 모델을 사용하였다.

Table 1. Simulation Parameters.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

| Parameter | | Value |
|-------------------|---------|--------|
| Voltage Variation | Sag | 0.3p.u |
| | Swell | 0.3p.u |
| Line | Voltage | 220V |
| Load | P | 70kW |
| | Q | 20kVar |

그림 9와 10은 계통의 전압변동이 없을 때와 Sag 발생시, DVR의 PAC제어를 통해 전압 및 무효전력을 보상한 결과이다. PAC제어에 의해 전원전압과 부하전압에 위상차가 발생하고, 전원전압과 전류가 동상이 되어 무효전력이 보상됨을 확인하였다. 그림 10에서 전원전압에 Sag가 발생하여도 전압 보상을 통해 부하전압은 일정하게 유지되며, 무효전력 역시 보상됨을 확인하였다.

그림 11은 계통 전압의 변동에 따라 DVR에서 발생한 유효전력을 배터리에 충·방전하여 SOC의 변화를 확인한 결과이다.

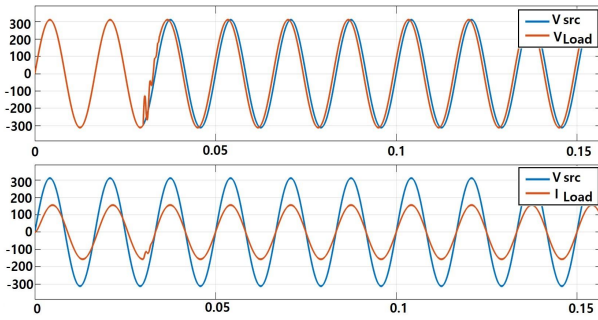


Fig. 9. Simulation results with steady state.

그림 9. 정상상태에서의 시뮬레이션 결과

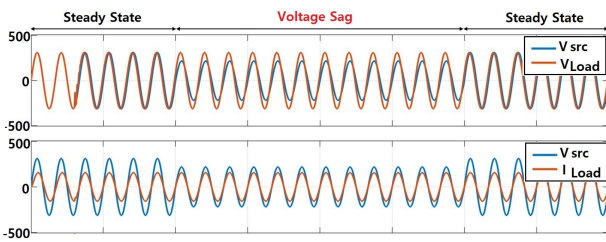


Fig. 10. Simulation results with Voltage Sag.

그림 10. 전압 Sag 발생시의 시뮬레이션 결과

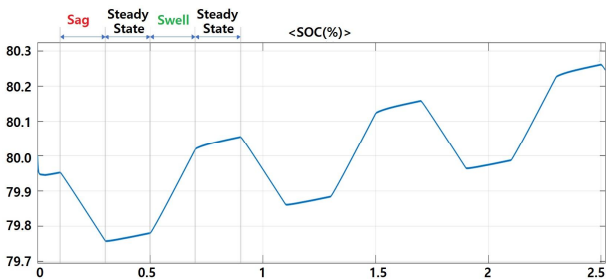


Fig. 11. Battery SOC with Line voltage variation.

그림 11. 계통전압 변동에 따른 배터리 SOC변화

정상상태와 Swell이 발생할 때는 계통에서 DVR을 통해 유효전력이 배터리에 충전되어 SOC가 상승하고, Sag가 발생할 때는 배터리에 저장된 유효전력이 계통으로 공급됨으로써 SOC가 하강함을 확인할 수 있다. 이에 따라 DVR은 부가적인 직류전원을 필요로 하지 않으며, 정상상태 및 Swell에서 발생한 유효전력을 배터리에 저장하여 전기차 충전, ESS 등으로 사용할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 배전계통의 전압 안정화를 위한 대표적인 직렬형 보상기인 DVR에 배터리를 연계

하고 전력위상제어(PAC)를 통하여 발생하는 유효전력을 배터리에 충·방전하기 위한 시스템과 제어를 설계하였다. 또한 DVR의 정격에 따른 최대 보상 가능 위상과 유효 전력을 해석하였다. 제안된 시스템은 추가적인 보상기기와 직류전원을 필요로 하지 않으며 기존의 DVR의 기능인 전압 변동 보상 이외에 계통의 무효전력을 동시에 보상할 수 있다.

References

- [1] H. Fujita and H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The integration of Series- and Shunt-Active Filters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.13, No.2, pp.315-322, 1998. DOI: 10.1109/63.662847
- [2] A. Ghosh and G. Ledwich, "Structures and control of a Dynamic Voltage Restorer (DVR)," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol.3, pp.1027-1032, 2001. DOI: 10.1109/PESW.2001.917209
- [3] M. H. Haque, "Voltage Sag correction by Dynamic Voltage Restorer with minimum power injection," *IEEE Power Engineering Review*, Vol.21, No.5, pp.56-58, 2001. DOI: 10.1109/MPER.2001.4311368
- [4] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.29, No.2, pp.397-403, 1993. DOI: 10.1109/28.216550

BIOGRAPHY

Seong-Hwan Kim (Member)



1991 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1995 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1998 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
 1999~ : Professor, Mokpo National University