

## 22.9kV 배전선로 적용을 위한 DVR 제어시스템 설계

김희중\*, 정용호\*, 권기현\*, 박태범\*, 전영수\*  
 \* LG산전 중앙연구소, \*\* 한전 전력연구원

### DVR Control System Design applied to 22.9kV Distribution System

H. J. Kim\*, Y. H. Chung\*, G. H. Kwon\*, T. B. Park\*, Y. S. Jeon\*\*  
 \*LG Industrial System R&D Center, \*\*KEPRI

**Abstract** - This paper describes control system design for the DVR(dynamic voltage restorer) consisted of a diode rectifier and series inverter applied to 22.9kV distribution system. The DVR control system is consisted of the main two parts. One is a voltage event detector using a neural network and the other is deadbeat controller for the output voltage and current control of the DVR. A simulation model was developed for analyzing performance of the controller and the whole system. The results confirm that the DVR can restore load voltage under the fault of the distribution system.

### 1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 사용이 급증하고 있는 컴퓨터와 사무자동화 기기, 로봇과 생산자동화기기, 의용전자기기와 통신기기 등의 산업용 기기들은 배전계통에서 발생하는 순간정전(interruption), 순간전압강하(voltage sag), 순간전압상승(voltage swell) 등과 같은 외란에 대하여 대단히 민감하게 동작하게 되며, 이러한 외란을 적절히 제거하지 않을 경우 관련 장비의 고장이나 오동작을 일으켜 생산 지연이나 조업중단과 같은 막대한 손실을 초래하게 된다[1][2][3].

이에 대한 대책으로 최근 DVR(Dynamic Voltage Restorer)에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[4]. DVR은 일반적으로 전압원 인버터가 선로에 주입변압기를 통해 직렬 연결된 구조를 가지며 전원 측의 각종 외란으로부터 적절한 보상동작을 수행하여 부하에 양질의 전원을 공급하게 된다. 그림 1은 2MVA DVR 설계를 위해 본 논문에서 다루고 있는 DVR의 기본 구조를 나타내고 있다.

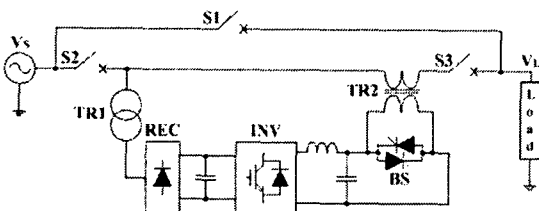


그림 1. DVR의 구조

이러한 DVR의 보상성능을 결정하는 주요 요소로는 외란에 대한 빠른 검출과 보상전압에 대한 정확한 제어라 할 수 있다. 일반적인 외란 검출방식으로는 평균치 검출기법과 동기좌표계 검출기법을 들 수 있다. 평균치 검출기법은 전압의 평균치를 구해 선로전압의 외란 유무를 판별하는 방식으로 평균치 연산을 위해 최소 반주기의 시간을 필요로 하며, 적분연산을 위한 정확한 영교차점 검출을 필요로 한다. 동기좌표계 검출기법은 일반

적으로 불평형 조건에서 3상에 대한 정보를 모두 포함하기 위해 입력전압을 동기좌표계로 변환하여 검출하는 방식이다. 불평형 전압을 동기좌표계로 변환시키기 위해서는 우선 대칭좌표법을 사용하여 정상성분의 전압을 연산하게 되며, 연산과정을 통해 불평형 전원전압의 평형성분인 정상분의 전압을 얻을 수 있다. 이를 동기좌표계 상에서의 연산과정을 통해 직류 성분의 값을 구할 수 있다. 그러나 3상 평형상태에서는 동기좌표변환 결과로 직류성분이 나타나지만 지락사고와 같은 외란사고에 대해서는 전원의 위상이 틀어지기 때문에 교류성분을 포함하게 된다. 또한 위의 검출방식은 연산과정이 다소 복잡하고 3상을 통합적으로 다루기 때문에 각상에 대한 정확한 외란 상태를 파악하기가 난해하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 신경망의 weight factor를 이용한 새로운 외란검출방식을 제안하였다. 제안된 검출방식은 학습과정을 통해 순시적으로 각상의 최대값을 직류값 형태로 연산하게 되며, 독립적인 상별 검출방식을 취하고 있기 때문에 각상에 대한 개별 보상이 가능하다. 또한 DVR 성능의 또 다른 주요 요소인 보상전압제어에 대해서는 그동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 제어기 설계가 용이한 PI제어기의 경우 DVR의 제어대상이 교류이기 때문에 상대적으로 직류제어에 비해 제어성능이 떨어진다 할 수 있으며, 큰 이득값을 가지게 되어 제어기 자체가 불안정하게 된다. 이러한 이유로 본 논문에서는 실시간 제어를 위해 Deadbeat 제어기를 설계하여 적용하였다[5][6]. 논문에 사용된 Deadbeat 제어기는 내측에 전류제어기를 포함한 전압제어기 형태로 구성되어 있으며, 이는 적절한 전류 제어를 통해 DVR 초기 투입시점에서의 과전류현상을 억제하기 위함이다.

### 2. 제어시스템 설계

그림 2는 본 논문에서 적용된 DVR의 제어기를 나타내고 있다. DVR의 제어구조는 크게 위상연산을 위한 PLL부와 보상전압 연산부, 전압외란 검출부, 보상전압 제어부로 구성되어 있다. 본 논문에서 적용된 DVR은 상시운전 형태가 아닌 외란발생 순간에만 동작하게 되어 있어 정상시에는 각상 인버터의 상단스위치를 턴온상태로 유지하게 된다.

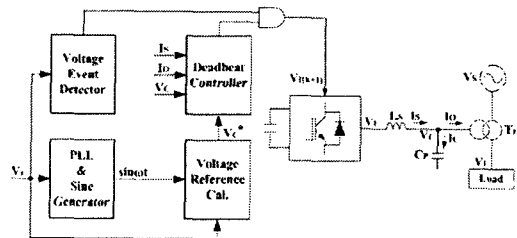


그림 2. DVR 제어블록도

## 2.1 전압외란 검출기

전원전압을  $v = V_m \sin(\omega t + \theta)$ 라 하고, 이 식을 삼각함수 합성의 정리에 의해 다시나타내면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$v = V_m \cos(\theta) \sin(\omega t) + V_m \sin(\theta) \cos(\omega t) \quad (1)$$

위 식 (1)의 우변 첫 번째 항과 두 번째 항은  $\theta$ 에 의해 결정되는 크기성분과  $\sin(\omega t)$ 와  $\cos(\omega t)$ 의 정현파 성분으로 구성됨을 볼 수 있으며, 이는 임의의  $\sin(\omega t)$  성분과  $\cos(\omega t)$  성분의 크기를 적절히 조절함으로써 전원전압  $v$ 를 생성할 수 있음을 알 수 있다.

이를 위해 신경망의 Delta Rule을 적용하여 식 (1)을 정리하면 다음 식 (2)와 같이 표현된다[7].

$$Y = WX \quad (2)$$

여기서,  $Y$ 는 Delta Rule에 의해 추정된 값이며,  $W$ 와  $X$ 는 다음과 같다.

$$W = [V_m \cos\theta \quad V_m \sin\theta]$$

$$X = [\sin(\omega t) \quad \cos(\omega t)]^T \quad (3)$$

위 식을 적용한 Delta Rule 블록도를 나타내면 그림 3과 같다.

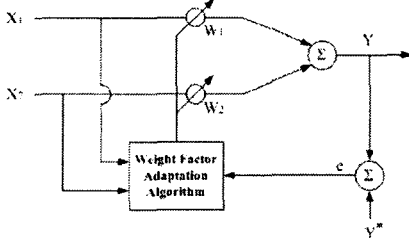


그림 3. Delta Rule을 적용한 Adaptive Linear Combiner

그림 3에서 Weight Factor Adaptation Algorithm에 대한 수식은 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$W(k+1) = W(k) + \alpha X(k)e(k) \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 학습률을 나타내며,  $W$ 값의 변화 추이를 통해  $Y^*$ 의 최대값을 관측할 수 있다.

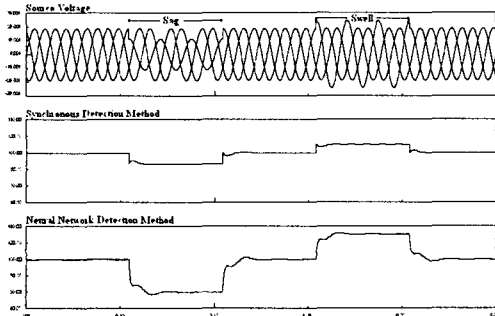


그림 4. 전압외란 검출

그림 4는 한상 Sag와 Swell이 발생했을 경우, 동기좌표 검출방식에 의한 외란 검출신호와 신경망의 Delta Rule을 이용한 외란 발생 상의 전압외란 검출 결과를 보여준다. 두 검출방식의 검출결과를 통해 알 수 있듯이 전압외란 시점에서의 검출신호 변화가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 동기좌표 검출방식의 경우, 한상의 외란 발생에 대해서 3상의 합성 형태로 검출신호가 표현되기 때문에 각 상에 대한 정확한 외란 상태를 파악하기가 난해하며 이에 따른 보상신호의 선정이 명확하지 않다는 것이 단점으로 작용한다. 이에 반해, Delta Rule을 이용한 검출방식은 각상에 대해 독립적으로 외란 검출이 이루어지고, 외란 정도에 따른 검출신호의 변화가 명확하게 표현되기 때문에 각상에 대한 외란의 크기를 정확히 알 수 있으며, 다른 상에 영향을 주지 않고 외란이 발생한 상에 대해서만 보상을 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

## 2.2 Double Dead Beat 제어기

그림 5는 본 논문에서 적용한 Double Dead Beat 제어기의 제어 블록도를 보여준다. 제어기의 전체구조는 DVR 보상전압의 빠른 응답특성으로 인한 과도전류 발생을 최소화하기 위해 전압제어기 내에 전류제어기를 두는 이중 구조형태로 제어기를 구성하였으며, 제어기의 시지연 요소를 최소화하기 위해 부하전류 예측방식을 적용하였다.

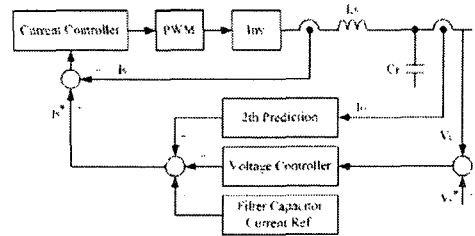


그림 5. Double Dead Beat 제어 블록도

그림 6은 Sag 발생의 경우에 있어 Double Dead Beat 제어기의 제어동작특성을 보여준다. Inner Loop의 전류제어기 동작을 통해 외란보상 시점의 초기 과도 구간에서의 전류가 2,000[A]내에서 제한되는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 2MVA DVR의 스위칭 소자로 사용된 IGBT의 전류정격과도 밀접한 관계를 가지고 있다.

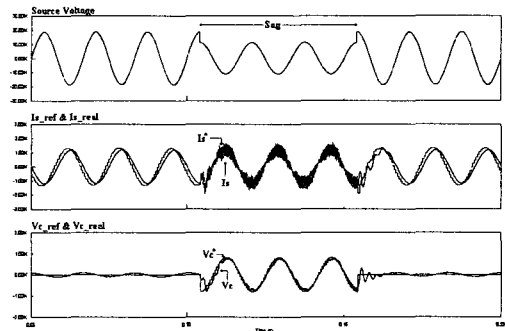


그림 6. 제어기 동작특성

## 3. 시뮬레이션

제안된 외란 검출기법과 제어방식을 2MVA DVR에 실제 구현하기에 앞서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레

이전 모델은 그림 7과 같이 PSIM으로 모델링 하였다. 모델 구성은 외란사고 발생을 모의하기 위한 전원부와 강압변압기를 포함한 4MVA 부하 그리고 2MVA급 DVR로 구성되어 있으며, 시뮬레이션에 사용된 구체적인 파라미터는 표 1과 같다.

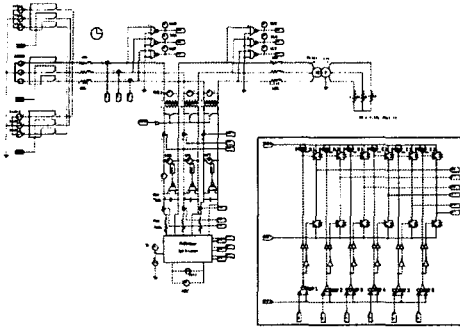


그림 7. 시뮬레이션 모델

표 1. 시뮬레이션 파라미터

전원전압	22.9kV, 60Hz	
부하용량	4MVA	
강압변압기	22.9kV : 440V	
DVR	용량	2MVA
	보상정도	Sag : 50%
		Swell : 130%
	스위칭 주파수	2kHz
	Filter L	200uH
	Filter C	752uF
주입변압기	9.0659 : 1	

그림 8은 제안된 외란사고검출 기법과 제어동작을 확인하기 위해 전원전압에 40%의 순시전압강하와 130%의 순시전압상승을 발생시켰을 경우의 DVR 보상전압과 보상에 따른 부하전압을 보여준다. 전원의 전압외란 발생에 따른 DVR의 외란검출 동작과 보상전압의 형성으로 인해 부하전압이 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있다.

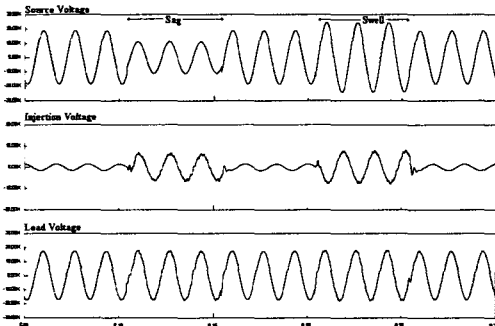


그림 8. 전압외란 발생에 대한 보상결과

#### 4. 결 론

본 논문을 통해 기존의 전압외란 검출기법의 단점을 보완할 수 있는 신경망의 Weight Factor를 이용한 새로운 외란 검출기법을 소개하였다. 제안된 외란검출기법은 일반적으로 많이 사용되는 3상을 합성하여 검출하는 동기좌표 검출기법의 단점을 보완 할 수 있으며, 각 상의

외란에 대해 독립적으로 검출할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 단상 시스템의 외란검출 적용에도 가능하다 할 수 있다. 또한 전압제어기 내에 전류제어기를 둔 Double Dead Beat 제어기를 사용하여 보상 초기 과도구간에서의 과도전류를 제한함으로써 시스템을 안정화 하였다. 시뮬레이션을 통해 검증된 검출기법과 제어기는 2MVA의 DVR에 실제 적용을 할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] M.H.J. Bollen, "Voltage sags: Effects, mitigation and prediction," Power Engineering Journal, pp. 129-134, June, 1996.
- [2] M. McGranaghan, D. R. Mueller and M. J. Samotyj, "Voltage sags in industrial systems," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993.
- [3] D. Povh, K. Pregizer, M. Weinhold and R. Zurowski, "Improvement of Supply Quality in distribution systems," CIREN'97, Birmingham, June, 1997.
- [4] Westinghouse Science & Technology Center, "A Novel Approach to Eliminate Distribution System Disturbances", Westinghouse Research Memo 92M015, November, 1992.
- [5] T. Kawabata, T. Miyashita, Y. Yamamoto, "Digital Control of Three-Phase PWM Inverter with LC Filter", IEEE Trans. Power Electronics, vol.6, no.1, pp.67-72, Jan. 1991.
- [6] T. Kawabata, Y. Shikano, S. Higashino, Y. Yamamoto, M. Ueda, Kawagishi, "Chargerless UPS Using Multi functional BIMOS inverter" IEEE IAS Annual Meeting, pp.513-520, 1986.
- [7] Bernard Widrow, Michael A. Lehr, "30 Years of Adaptive Neural Networks : Perceptron, Madaline, and Backpropagation", Proceeding of The IEEE, Vol. 78, No.9, pp.1415-1442, September, 1990.