

DVR제어알고리즘 개발

이상동, 이선재, 김명찬, 이현원, 김지홍
 현대중공업(주) 기전연구소 전력기술연구실

A Design of DVR's Control Algorithm

S.D.LEE, S.J.LEE, M.C.KIM, H.W.LEE, J.H.KIM
 Hyundai Heavy Industries Electro Mechanical Research Institute

Abstract-본논문은전력품질개선장치인 DVR(Dynamic Voltage Restorer)시스템의 제어알고리즘 개발에 관한 것이다.

DVR은 배전계통에 직렬변압기를 통해 설치되어 전원의 순간전압강하(Voltage sag)를 보상하는 장치이며 전력변환장치 직렬변압기 에너지저장장치, 충전장치, 보호장치등으로 구성된다. 지락사고, 비선형부하의 순간투입, 뇌서지등 여러 요인에 의해 3상전원에서 발생하는 다양한 형태의 전압sag 보상이 가능한 제어알고리즘 모델을 제시하고 컴퓨터시뮬레이션을 통해 기본성능을 확인한 후 소형 DVR을 제작해 시험하였으며 이시험결과를 실 용량 DVR시제품의 설계에 이용하였다.

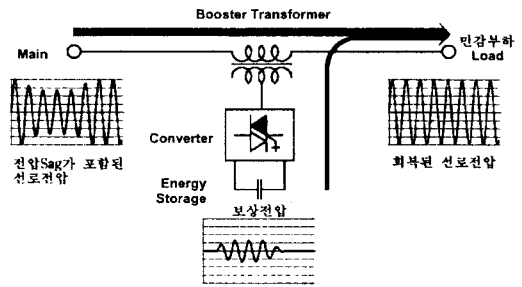


그림1 DVR의 기본 동작

1. 서 론

최근의 전력산업은 사업영역에 대한 규제가 완화되어 공급자측면에선 송배전설비의 효율적인 이용이 요구되고 있으며 사용자에게는 민감한 부하의 증가로 공급전력의 신뢰성이 아주 중요하게 되어 전력품질에 관심이 집중되고 있다. 이러한 전력품질에 영향을 주는 항목 중에서 가장 심각하게 문제가 되는 것은 순간적인 전압강하와 순간정전이다. 특히 반도체산업, 제지산업, 석유화학산업등의 자동화 생산공정이 가장 쉽게 공급전력의 영향을 받아 수ms의 짧은 트러블에서도 심각한 피해를 입는 경우가 발생한다. 따라서 이러한 민감한 부하에 대해서는 공급자 또는 수용가에서 별도의 조치가 필요하다. 전력품질개선을 위해 널리 사용되고 있는 기기는 UPS가 있으나 UPS는 전원이 정상상태에서도 계속하여 전부하전력을 부담하고 있어 효율이 낮고 battery를 사용한 축전장치가 기기의 비용을 크게 증가시키는 단점이 있어 주로 컴퓨터, 기기제어부 전원의 보호장치로 이용된다. 병렬형 전원품질개선장치인 Active filter는 전원의 역률개선과 고조파제거등의 목적으로 사용되지만 순간전압강하보상기능은 없다.

본 논문에선 선로에 직렬변압기를 이용해 접속되어 순간전압강하(Voltage sag)를 보상하고 정상상태에선 소모전력을 최소화해 시스템효율이 높은 Dynamic Voltage Restorer(DVR)의 실 용량 시스템 개발을 위해 DVR의 제어알고리즘을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션 및 소형모델시험을 통해 기본 성능시험을 실시하였다.

2. DVR제어

2.1 개요

전원전압의 순간적인 강하(Voltage sag)발생시 보상전압을 주입하는 것에 의해 부하 측 전압은 강하 발생 없이 항상 기준전압크기를 반지름으로 하는 일정한 원의 궤도에서 움직이도록 하는 것이 DVR의 제어목적이며 적절한 연산을 통해 보상전압의 크기와 위상을 결정한다. 3상전원의 경우 전압sag 발생원인에 따라 sag의 형태가 다양하므로 이에 따른 보상전압의 크기와 위상을 결정해 줄 수 있는 제어알고리즘이 필요하다.

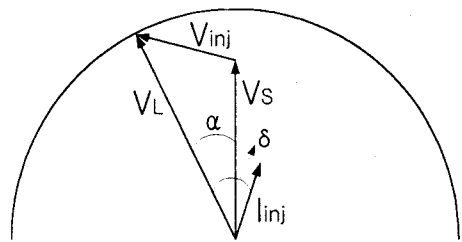


그림2 DVR 동작 전압벡터도

(V_L : 부하전압, V_S : 전원전압, V_{inj} : 보상주입전압)

2.2 제어알고리즘 설계

3상전원용 DVR 제어부 구성을 위해 3상 공급전원을 아래 식과 같이 정지계 2상변환후 기준위상을 사용하여 다시 동기계변환을 하면 3상전원의 위상성분과 크기 성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cdot \sin \theta \\ V_m \cdot \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m \cdot \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2V_a - V_b - V_c) \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (V_b - V_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cdot \sin \theta \\ V_m \cdot \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha e} \\ V_{\alpha c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & -\sin \theta_p \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

V_{qe} 는 3상전원의 위상성분이며 V_{de} 는 3상전원의 크기를 나타내는 성분으로 검지위상 θ_p 와 전원 U상의 위상 θ 가 동일할 경우 $V_{qe}=0$, $V_{de}=V_m$ 이된다. 이것을 이용해 전압강하검지와 위상검지, 그리고 보상전압의 크기와 위상을 연산할 수 있다.

2.2.1 전압강하검지

3상전원의 크기성분 V_{de} 를 감시하여 설정값이하로 될 경우 전원전압강하(sag발생)로 판단할 수 있으며 이때 설정값은 보상하려고 하는 sag의 크기에 따라 정해진다. 3상전원 모두에서 동일한 크기의 전압sag가 발생했을 경우 위와 같은 방법에 의해 검지가 가능하지만 1상 또는 2상에서 만 전압sag가 발생하거나 각상 전압강하의 크기가 틀릴 경우 V_{de} 가 일정한 값을 갖지 않으므로 다른 방법으로 전압강하를 검지 해야 하는데 이 때는 3상의 평형조건이 맞지 않는 경우이므로 평형조건을 검사하여 전압Sag 발생여부를 검사한다.

2.2.2 보상전압 결정

전원전압 정상상태에선 동기계 변환 값인 V_{qe} , V_{de} 를 계속 연산하고 순간전압강하가 발생하면 직전 정상상태의 V_{qe} , V_{de} 값을 저장한 후 이 값을 다시 정지계 변환하여 3상의 기준값으로 하고 여기서 전압강하상태의 전원 검지 값과의 차이를 펄스폭변조 기준 값으로 한다. 정지계 변환시 사용되는 위상은 PLL과 Freeze 시퀀스를 통해 얻어지며 전압sag 발생시 위상틀림이 함께 있어도 부하 측 전원은 sag발생전의 전원을 유지하도록 보상할 수 있다. 그림3은 DVR제어부의 전체구성도이다. 3상전원에서 발생할 수 있는 여러 형태의 전압sag에 대비해 각상의 보상전압을 임의로 출력하는 것과 이를 위해 필요한 전원전압 위상 검지부를 S/W로 구현하여 제어부에 포함시켰다.

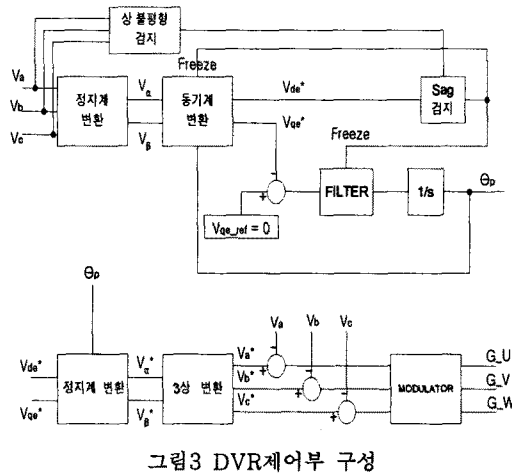


그림3 DVR제어부 구성

2.2.3 펄스폭 변조

전원각상의 보상전압을 독립적으로 출력시킬 수 있는 펄스폭변조방식이 필요하므로 단상인버터 형식의 유니폴라 펄스폭 변조방식을 사용하였다. 이와 같은 펄스폭변조방식의 장점은 직류전압의 이용률이 높아 전압sag 발생시 에너지저장장치인 캐패시터의 방전시간에 따른 보상전압출력시간의 한계를 늘리는 효과가 있으며 실제 출력되는 전압은 기본 스위칭 주파수의 2배가 되어 고조파제거를 위한 필터설계가 용이한 장점이 있다. 또한 전

압강하가 발생하지 않는 정상상태에선 전원선로와 연결되는 직렬변압기 1차측(DVR측)전압을 0전압이나 또는 임의의 전압으로 유지할 수 있어 선로의 역률 개선, 직류에너지충전등의 기능을 추가할 수 있다.

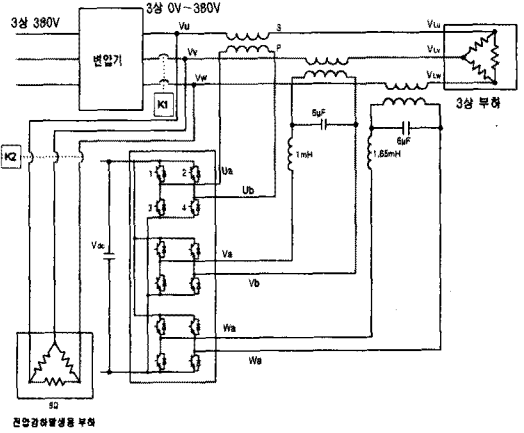


그림4 시험장치 구성

3. 시뮬레이션과 시험

3.1 컴퓨터 시뮬레이션

설계된 DVR제어알고리즘의 기본 동작 검증을 위해 상용SIMULINK프로그램과 수식모델링 프로그램작성의 2가지 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. MATLAB SIMULINK를 이용해 시뮬레이션을 하면 DVR과 계통과의 연계된 특성을 분석하기에 장점이 있으며 수식모델링에 의한 시뮬레이션의 경우는 펄스폭 변조를 포함한 제어부의 특성을 여러 가지 파라미터를 변경해 시스템응답을 파악할 수 있는 점이 편리하다.

3.1.1 SIMULINK를 사용한 시뮬레이션

그림5와 같이 SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 표1에 시뮬레이션에 사용한 전원계통조건을 정리하였다. 그림에서 배전용변압기(Distribution Trans.) 앞단 임의의 지점에서 지락 또는 단락사고를 모의하기 위해 스위치를 배치하였으며 부하 측에도 단락사고 모의를 위한 스위치를 두어 부하 단락시 DVR을 통해 흐르는 단락전류의 변화를 시뮬레이션하였다.

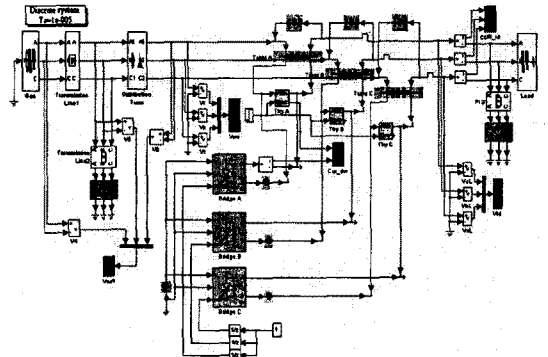


그림5 MATLAB에 의한 계통 시뮬레이션도

항목	사양
송전계통전압	154 KV
배전계통전압	22.9 KV
부하용량	3 MVA
배전용 변압기 단락용량	60 MVA
주파수	60 Hz

표 1 SIMULINK 시뮬레이션 계통 조건

그림6은 선로전압Sag 발생시 DVR에서 출력되는 보상전압 파형이다. DVR출력 파형을 선로에 주입하기 위해서는 적절한 수동필터가 필요하며 시스템 사상을 고려하여 직렬변압기1차측(DVR측) 또는 2차측(전원선측) 중에서 필터링을 하는 것이 바람직하다.

그림7은 sag 발생시 선로 U상전압과 부하 측 U상전압 파형이다. 선로전압의 sag발생에도 부하전압은 정상값으로 보상되고 있다.

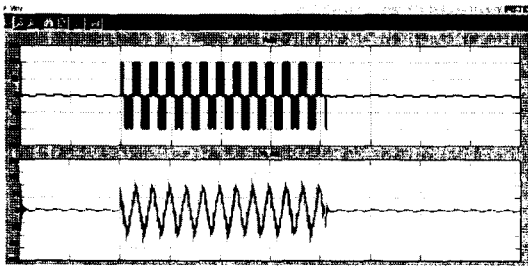


그림6 DVR 동작 파형 (필터링 전, 후)

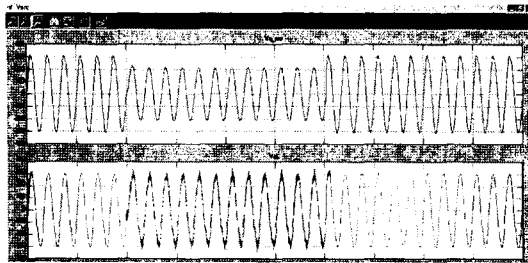


그림7 Sag 발생시 부하 측 전압 보상

3.1.2 수식모형을 사용한 시뮬레이션

설계된 DVR제어알고리즘의 기본적인 특성확인과 소용량 DVR 시험을 위한 선행작업으로 수식모형을 사용해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 제어부 모델링은 그림3의 제어구성도와 동일하게 하였으며 전력회로는 그림4의 시험회로를 모델링하였다. 또한 3상전원에서 발생하는 다양한 형태의 전압sag에 대한 DVR동작 시험을 하기 위해선 정교한 sag 모의 장치가 필요하기 때문에 먼저 장치 제작에 앞서 시뮬레이션을 통해 DVR 제어부 동작을 파악하였다.

그림8은 선로전압에서 40%크기의 순간전압강하가 발생할 때에 제어기연산에 의한 PWM 기준전압과 DVR 출력전압이 발생하는 것에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림9는 3상전원에서 동일한 크기의 전압강하가 발생했을 경우 보상된 부하전압이며 그림10은 3상에서 발생한 sag의 크기가 다를 경우 보상된 부하전압파형이다. 설계된 제어알고리즘은 이러한 시뮬레이션 결과로 다양한

형태의 sag에 대해 부하측 전압을 안정시키고 있음을 확인 할 수 있다.

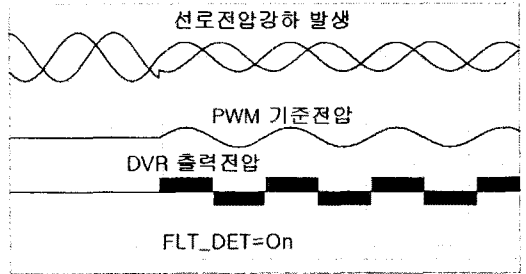


그림8 전압강하시 PWM 기준값 출력

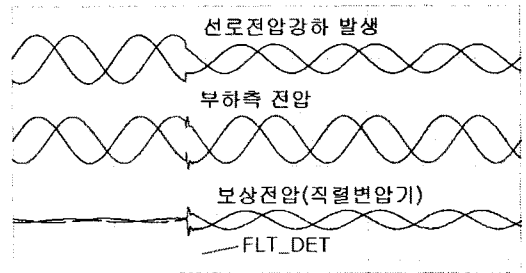


그림9 3상 동일 전압강하시 부하전압 보상

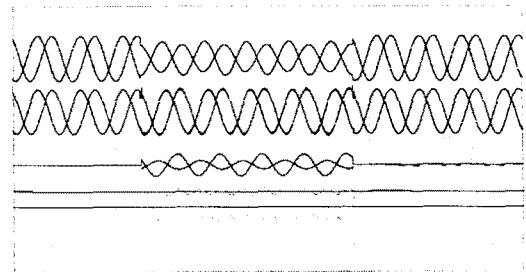


그림10 Sag 크기와 위상이 각상별로 틀릴 경우

3.2 소형 DVR시험

시험회로는 그림4와 같이 구성하였으며 시험조건은 다음과 같다.

항목	내용
전원전압	3상 200V
전압강하크기	20%크기 강하, 위상틀림 25°
DVR 회로	6 Half Bridge 회로
직류전원	DC110V P/S & 커패시터 뱅크 사용
부하	저항부하 1~3kW

약800ms동안의 전원전압Sag 발생시 DVR이 동작되지 않을 경우 부하 측 전압 파형은 그림11과 같이 역시 전압강하가 발생하며 DVR에 의해 강하된 전압만큼 보상하였을 경우는 그림12와 같이 부하 측 전압은 정상상

태를 유지할 수 있음을 보여주고 있다.

부하측 전압강하보상시 DVR이 신속하게 응답하여야 하며 늦어도 전원의 첫 번째 피크에서는 보상이 될 수 있도록 약3ms 이내로 응답속도를 갖는 것이 바람직하다. 그림13은 전압강하 순간 약2ms 이내에 보상전압이 출력되어 부하 측 전압에 주입되고 있음을 보여준다.

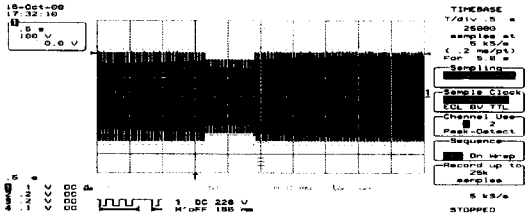


그림11 전원전압강하에 위한 부하전압강하

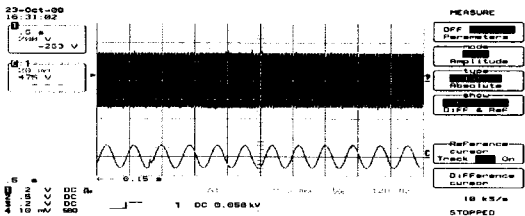


그림12 전압강하 발생시 보상된 부하전압

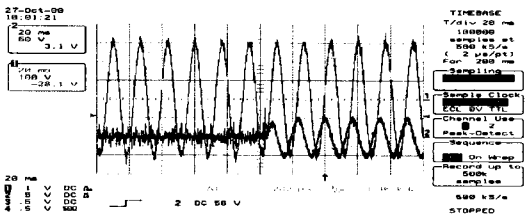


그림 13 전압강하 순간 부하전압 & 보상전압

DVR의 출력은 그림14와 같은 스위칭 파형이기 때문에 전원에 주입하기전 리액터와 캐패시터를 사용해 필터링을 하게 되는데 이때 스위칭주파수와 펄스폭변조방식에 따라 필터링 계수가 틀려지게 되므로 가능한 적은 비용으로 필터링이 가능하도록 설계하여야 한다.

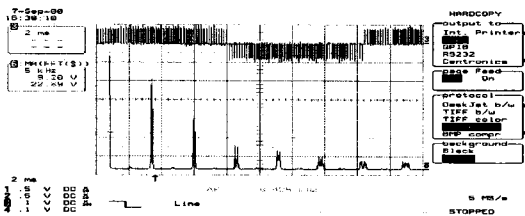


그림14 DVR 보상전압 출력 파형 & FFT

4. 결 론

전력품질개선용 시스템인 DVR의 상용화를 목적으로 제어알고리즘 설계에 관해 연구하였다. DVR이 현장에서 실용되기 위해서는 현장의 조건에 적합한 제어부를 구성하는 것이 매우 중요한 과제이다. 전압sag의 발생 원인 및 전압sag의 형태가 수용가위치에 따라 틀릴 수

있고 부하의 형태에 따라 전압 또는 위상중심의 보상이 이루어 질 수도 있다. DVR시스템은 고압, 대용량의 전력변환장치를 사용하기 때문에 위와 같은 항목을 현장시험을 통해서 모두 검증하기가 매우 어렵다. 따라서 시뮬레이션과 소형모델에 의한 시험을 통해 신뢰성 있는 결과를 얻어내는 기술의 연구가 반드시 필요하며 전력전자분야와 전력계통해석기술을 잘 조합할 수 있어야 상용 제품개발이 가능할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.McGranaghan "Overview of Power Quality Standards", Electrotek Concepts, Inc.
- [2] F.W.T. Davenport, "Voltage Dips and Short Interruptions in Medium Voltage Public Electricity Supply Systems", UNPEDE/DISDIP Report, 1990
- [3] K. Chan, A. Kara, "Voltage Sags Mitigation with an Integrated Gate Commutated Thyristor based Dynamic Voltage Restorer", 8th International Conf. on Harmonics and Quality of Power, pp. 14-16, Oct. 1998
- [4] Neil H. Woodley, L. Morgan, A. Sundaram, "Experience With An Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [5] E. John, "Experience with a Static Series Compensation Device(DVR) at a Semiconductor Facility", ABB Power T&D Company Inc., April 1999