2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

dq 정지, 동기 좌표계를 이용한 순간전압강하 보상

이교성*, 이용제, 박정균, 최현영, 김양모
충남대학교 전기공학과

Voltage Sag Compensation using dq Stationary and Synchronous Rotating Frame

Lee Kyo-Sung, Lee Yong-Jea, Park Jung-Gyun, Choi Hyen-Young, Kim Yang-Mo
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - Voltage Sags are the short-duration reductions in rms voltage caused by faults in the electric supply system and the starting of large loads, such as motors. In this paper, we use the dq transformation(dq stationary frame and dq synchronous rotating frame) for series voltage sag compensation algorithm. Analysis, simulation results are presented for voltage sags on a three-phase balanced voltage source.

1. 서 론

순간전압강하는 여러 전원장애 중에서 그 발생빈도가 가장 높으며 부하에 미치는 영향 또한 가장 커서 산업 전반에 걸친 생산량 감소, 장비의 오손, 재시동, 생산품질의 하락으로 막대한 경제적 피해를 야기하고 있다. 따라서 이에 대한 대책이 시급하다. 미국의 Electric Concepts사가 EPRI(Electric Power Research Institute)의 지원하에 1993년부터 1995년까지 27개월 동안 미국 전역에 걸쳐 300여개의 모니터링 시스템을 설치하고 측정한 결과 전체 전원장애의 92%가 순간전압강하에 의한 것으로 조사되었다.

일반적으로 순간전압강하는 크게 2가지 원인에 의해 발생하는데, 첫 번째 원인은 지락사고와 같은 자연적인 원인에 의해 발생하며, 두 번째는 대용량 모터의 기동과 같이 부하에 의해 발생하기도 하지만 그리 심각하지는 않다. 지락사고 발생시 사고지점의 전압은 거의 영전압으로 강하되고 이는 전력공급장치와 장비 사이에 짧은 시간동안 순간전압강하로 나타난다.

순간전압강하에 대한 방안은 크게 두가지 측면에서 고려할 수 있다. 첫 번째 송배전 계통로의 경우 사고의 발생 빈도를 줄이고, 사고 발생시 이를 빠른 시간내에 처리하여 순간전압강하의 영향을 최소화할 수 있다. 이를 위해서 피뢰기나 절연체의 성능을 향상시키고 설치를 늘리며 지상선로를 지하선로로 바꿔 사고를 방지할 수 있으며 고성능 차단기의 설치 등으로 피해를 줄일 수 있다. 그러나 이는 경제적 부담이 커서 수용가 측의 보상에 관심이 증대되고 있다. 수용가 측에서의 경우, 부하가 전압의 변화에 민감하게 반응하므로 순간전압강하를 빠른 시간내에 보상하는 것이 가장 중요한 문제이다.

UPS(Uninterruptible Power Supply)는 순간전압강하 뿐만 아니라 순간전압상승(Voltage Swells)이나 고조파까지 보상하여 성능면에서 우수하지만 많은 유지, 보수가 필요하며 배전계통에서는 경제적이지 못하다. 따라서 최근에는 계통에 직렬로 연결되어 전압강하를 보상해주는 DVR(Dynamic Voltage Restorer)에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. DVR은 UPS에 비해 순간전압강하만을 보상 목적으로 하기 때문에 경제적인 이점을 지니며, 시스템의 동특성이 뛰어나다는 장점을 지닌다.

본 논문에서는 dq 좌표변환을 적용한 순간전압강하의 보상을 제안하였다. dq 좌표는 변환과정에 따라 정지좌표계와 동기좌표계로 표현이 가능하지만 어떤 좌표계를 이용하여 보상하느냐에 따라 순간전압강하 보상의 주요 점인 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 동기좌표계에서의 보상과 정지좌표계에서의 보상을 구현하여 그 성능을 비교하였다.

2. 순간전압강하

순간전압강하는 송배전 계통상에서 지락사고나 대용량 부하의 기동으로 인해 발생하는 현상으로 IEEE Std. 1159-1995는 0.5 cycle에서 1분 동안 전력계통에서 전압이 rms 값으로 0.1pu ~ 0.9pu 이내로 감소하는 현상이라 정의하고 있다.

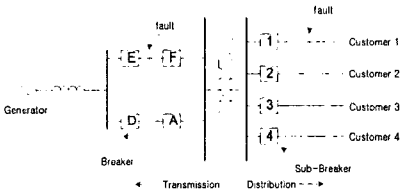

그림 1 송배전 계통로

그림 1은 송배전 계통로에서 고장이 발생하는 경우 순간전압강하가 어떻게 발생하는지를 보이고 있다. 수용가는 sub-차단기로 연결되어 급전선으로부터 전력을 공급받는다. 만약 이 급전선에서 고장이 발생하면 고장이 발생한 지점은 고속 차단기로 분리되고 고장선로와 이웃하는 계통선로로 전기를 공급받는 수용가에는 고장이 제거되는 시간동안 순간전압강하가 발생하게 된다. 이러한 순간전압강하의 주요원인은 지락사고가 가장 크며 대용량 전동기의 시동에 의해서도 발생하기도 하지만 이 경우 지속시간이 일반적으로 30 cycles 이상이며 전압강하의 크기가 그리 크지 않기 때문에 전압 깜박임(Voltage Flicker)으로 자주 언급된다. 순간전압강하의 크기는 사고발생 지점과 부하사이의 임피던스에 의해 결정된다.

3. dq 좌표계

임의의 3상 변수를 서로 직교하는 2상 변수로 나타내는 dq 좌표변환 형태가 제어에는 일반적으로 사용되어지는데, dq 좌표변환은 dq 정지좌표변환과 dq 동기좌표변환으로 구분된다. 이 dq 정지좌표계에서 임의의 위상각(θ)에 동기된 2상으로 변환하면 동기좌표계에서의 2변수를 얻을 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d^e \\ v_q^e \\ v_0^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = T\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\theta=0$인 경우, 즉 2상 축인 d축이 a축과 일치하는 경우를 정지좌표계로 표현하는데 이 경우 dq축상의 변수는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_d^s=\frac{2}{3}(V_a-\frac{1}{2}V_b-\frac{1}{2}V_c)$$
$$V_q^s=-\frac{1}{\sqrt{3}}(V_b-V_c) \quad (2)$$

정지좌표계의 dq성분을 전원전압과 같은 $\omega=2\pi f(\theta=\omega t)$의 각속도로 회전하는 동기좌표계로 변환하기 위해서 정지좌표축과 동기좌표축상의 변수 사이에는 식 (3)와 같은 관계를 가진다.

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)를 식 (3)에 의해 동기좌표계로 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d^e=\frac{2}{3}(V_a-\frac{1}{2}V_b-\frac{1}{2}V_c)\cos\theta+\frac{1}{\sqrt{3}}(V_b-V_c)\sin\theta$$
$$V_q^e=\frac{2}{3}(V_a-\frac{1}{2}V_b-\frac{1}{2}V_c)\sin\theta-\frac{1}{\sqrt{3}}(V_b-V_c)\cos\theta \quad (4)$$

4. 시스템 모델링

순간전압강하를 보상하기 위해 제어알고리즘을 구성하기 앞서 보상시스템의 구현을 위한 구성도를 설계하였다. 그림 2는 순간전압강하 보상기의 구성도이다.

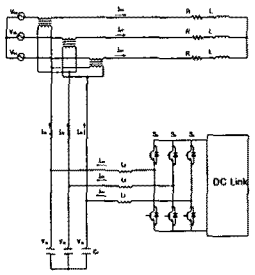

그림 2 Voltage Sag Compensation System

그림 2에서 나타나듯이 순간전압강하 보상 시스템의 직렬 보상기는 평상시에는 바이패스 스위치를 통하여 상용전원이 부하에 전력을 공급하다가 입력전압이 정격치의 90%이하로 되면 바이패스 스위치를 오프하고 인버터로 전압강하 분만큼의 전압을 발생시켜 직렬 주입변압기를 통하여 입력전원과 직렬로 가산되도록 하여 부하에 일정한 전압이 인가되도록 한다.
구성도를 바탕으로 실제 시스템을 수식적으로 풀면, 정지좌표계에서 3상 평형전원인 경우,

$V_a+V_b+V_c=0$ 이므로,

이를 식 (2)에 대입하면 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d^s=V_a$$
$$V_q^s=-\frac{1}{\sqrt{3}}(V_a+2V_b) \quad (5)$$

동기좌표계에서 3상 평형임을 고려하면 식 (4)는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$V_d^e=V_a\cos\theta+\frac{1}{\sqrt{3}}(V_a+2V_b)\sin\theta$$
$$V_q^e=V_a\sin\theta-\frac{1}{\sqrt{3}}(V_a+2V_b)\cos\theta \quad (6)$$

3상 전원을 동기좌표계로 변환하면 직류성분으로 표현된다. 이는 변환하기 이전의 상과 같은 각 속도로 동기시키므로 직류성분으로 보이며, 정지 좌표계로 표현하면 각속도가 0이므로 변환하기 이전과 마찬가지로 sine파의 형태로 나타난다. 3상 전원을 식 (7)로 정의하고

$$V_a(t)=V_m\sin\omega t$$
$$V_b(t)=V_m\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}) \quad (7)$$
$$V_c(t)=V_m\sin(\omega t+\frac{2\pi}{3})$$

이를 식 (5)에 대입하여 정지 좌표계로 나타내면

$$V_d^s=V_m\sin\omega t$$
$$V_q^s=V_m\cos\omega t \quad (8)$$

으로 d축 성분은 V_a와 동일한 상을 가짐을 알 수 있으며, 각 성분이 sine 파 형태를 취하고 있음을 알 수 있다. 식 (7)을 (8)에 대입하고 $\theta=\omega t$라 하여 동기좌표계로 나타내면

$$V_d^e=0$$
$$V_q^e=V_m \quad (9)$$

으로 일정한 직류값으로 표현됨을 알 수 있다.
동기좌표 상에서 인버터 출력전류 성분은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{od}^e=I_{Ld}^e+C_f\frac{dv_{cd}^e}{dt}+\omega Cv_{cq}^e$$
$$i_{oq}^e=I_{Lq}^e+C_f\frac{dv_{cq}^e}{dt}-\omega Cv_{cd}^e \quad (10)$$

인버터 출력전압에 대한 표현식은 식(11)으로 나타낼 수 있다.

$$v_{od}^e=v_{cd}^e+L_f\frac{di_{od}^e}{dt}+\omega Li_{oq}^e$$
$$v_{oq}^e=v_{cq}^e+L_f\frac{di_{oq}^e}{dt}-\omega Li_{od}^e \quad (11)$$

직류링크에 걸리는 캐패시터의 직류전압 모델링은 식 (12)으로 나타내어진다.

$$C_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt}=S_di_{od}^e+S_qi_{oq}^e \quad (12)$$

그림 3은 3상 평형 전원전압을 각각 정지좌표와 동기좌표로 변환했을 때의 파형이다.

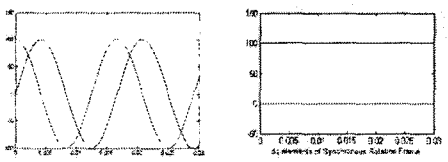

그림 3 정지 및 동기좌표계로 표현한 3상 평형전원

그림 3 정지 및 동기좌표계로 표현한 3상 평형전원

평형전원시에는 정상분과 역상분이 서로 평형을 이루므로 동기좌표계를 이용한 dq 변환값은 일정한 직류성분으로 나타내어지며, 정지좌표계 역시 d축 성분이 V_a와 일치함을 알 수 있다.

5. 제어 알고리즘

제어기는 전압제어에 기반을 두고 있으나 이상적인 정현파 출력전압을 구현하기 위해 LC 필터단의 커패시터 양단의 전압에 대한 외부 전압 제어루프와 인덕터에 흐르는 전류에 대한 내부 전류 제어루프의 이중제어 구조를 가진 제어기를 제안하였으며, 공간벡터 PWM 방식을 이용하여 스위칭 함수를 발생시키도록 하였고 PI제어를 사용하였다. PI제어기를 보완하기 위해 IP제어를 병행하여 오버슈트를 줄였으며 제어기의 출력이 제한되는 경우 적분기의 오차누적에 의해 발생하는 Windup 현상을 막기 위해 Anti-Windup 기법을 적용하여 제어기를 설계하였다.

6. 시뮬레이션 및 결과

제안된 제어 알고리즘을 토대로 3상 평형전원 전압에서 사고전압을 보상하기 위한 제어기를 설계하고 이를 dq 정지좌표계와 동기좌표계 내에서 구현하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 Matlab Simulink를 사용하였다.

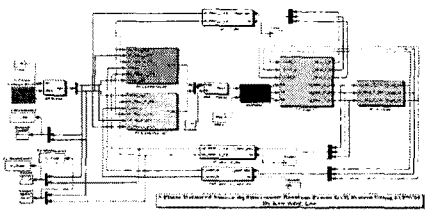

그림 4 Matlab Simulink Simulation

그림 4는 Simulink로 구성한 제어시스템이다. 구현된 시스템의 PWM기법은 공간벡터 PWM을 사용하였으며 구성된 PWM 블록은 다음 그림 5와 같다.

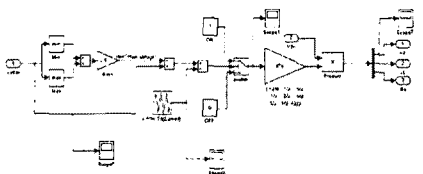

그림 5. 공간벡터 PWM block diagram

시뮬레이션을 위한 조건으로, 10kHz의 스위칭 주파수를 가지며 1ms에서 Sag가 3상 모두 발생하도록 하여 50V의 보상을 해 주도록 보상기를 설계하였다. 두 좌표의 특성을 보기 위해 낮은 제어 이득으로 시뮬레이션하여 결과를 보았다.

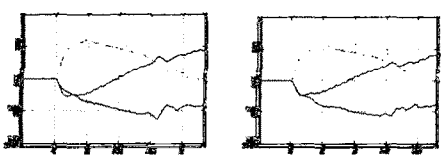

그림 6 정지, 동기 좌표계에서의 3상 출력

그림 6에서 보는 바와 같이 동기 좌표계에서보다 정지좌표에서의 a,b,c 상의 출력에 어느 정도의 오버슈트가 있는 것을 볼 수 있다.

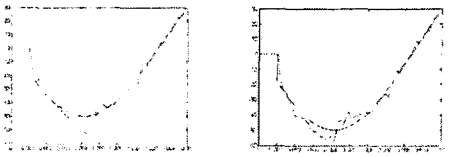

그림 7 정지, 동기 좌표계에서의 입,출력 비교

그림 7은 정지, 동기 좌표계로 시뮬레이션한 출력 a상의 값을 입력 a 상과 비교한 결과이다. 보이는 바와 같이 동기좌표계로 구현한 경우 정지좌표계보다 좀더 나은 동특성을 가짐을 볼수 있었다.

7. 결 론

전원장애의 가장 큰 부분을 차지하는 순간전압강하의 보상은 전력품질의 향상에 있어서 중요한 과제이다. 본 논문에서는 보상기 제어를 위한 알고리즘으로 PI제어기를 기본으로 IP제어와 Anti-Windup 기법을 적용한 이중제어 기법을 도출하였으며, dq 정지좌표계와 동기좌표계로 구현하여 그 특성을 비교하였다.

동기좌표로 표현되는 경우 정지보다 약간의 변환과정이 더 부가되지만 평형 3상에서는 정지보다 나은 동특성을 가짐을 확인할수 있었다.

제안된 기법과 알고리즘을 바탕으로 좀더 간단하고 효율적인 제어 알고리즘의 도출과 보상기에 적용하여 실험을 통한 검증이 향후 과제라 하겠다.

[참 고 문 헌]

[1] M.F.McGranaghan, D.R.Mueller, M.J.Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems", IEEE Trans. Industry Applications, Vol.29, No.2, pp397-403, 1993

[2] Haddad.K, Joos.G, Chen.S, "Control Algorithms for Series Static Voltage Regulators in Faulted Distribution Systems", Power Electronics Specialists Conference, PESC 99, 30th Annual IEEE, Vol.1, pp418-423, 1999

[3] F.I.Ahmed, A.M.EL-Tobshy, A.A.Mafouz, M.M.S.Ibrahim, "P-I and I-P Controllers In A Colsed Loop For DC Motor Driver", Power Conversion Conference - Nagaoka 1997, Proceedings of the, Vol 2, pp. 613-618, 1997

[4] Youbin Peng, Damir Vrancic, Raymond Hanus, "Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers", IEEE Trans. on Control System, Vol. 16, No. 4, pp.48-57, 1996

[5] Varancic, D, Peng, Y, "Some Practical Recommendations In Anti-windup Design", Control '96, UKACC International Conference on(Conf. Publ. No. 427), Vol : 1, 2-5, pp 108-113, 1996

[6] Montero-Hernandez, O.C, Enjeti, P.N, "A fast Detection algorithm suitable for mitigation of numerous power quality disturbances", Industrial Application Conference 2001, 36th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 4, pp 2661-2666, 2001

본 연구는 한국과학재단
목적기초연구지원으로 수행되었음.
과제번호: R01-2000-000267-0