

Voltage sag의 특성과 dq좌표변환을 이용한 검출법에 대한 연구

김용상\*, 김도훈, 임상욱, 이교성, 김양모  
 충남대학교 전기공학과

The Characteristics of Voltage Sag and a Study about Detection Algorithm Using the DQ Transformation

Yong-Sang Kim\*, Do-Hun Kim, Sang-Wook Yim, Kyo-Sung Lee, Yang-Mo Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

**Abstract** - Voltage sags are known as a serious problem causing mal-operation of equipment like computers, process controllers and adjustable-speed drives. In this paper, characterization of voltage sag and an overview of methods used in the mitigation of voltage sags are presented. Moreover a fast detection method for voltage disturbances is explored. The algorithm is based on the theory that allows a set of three-phase voltages be converted the d-q value. The utility input voltages are sensed and then converted to some quantities in the d-q transformation. And the difference between reference value and input value are showed that some disturbances happened in the system.

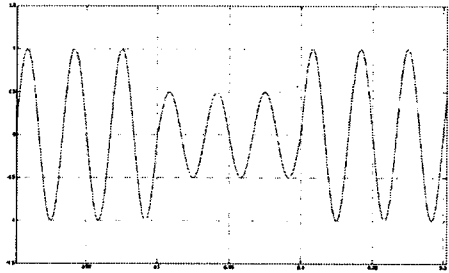


그림 1. A Voltage Sag

1. 서 론

최근 산업이 급속도로 발달함에 따라 많이 보급되어 있는 컴퓨터와 자동화 설비는 전압변화에 민감하기 때문에 전력품질(Power Quality)에 따라 성능저하, 고장, 장비 오작동 등을 일으켜 막대한 경제적 손실을 일으킨다. 이러한 문제점 때문에 전기시스템의 신뢰성과 품질향상을 위한 수많은 노력이 있었다. 그러나 아직도 “전력품질”문제는 현대산업사회에서 산업설비들이 고도로 자동화와 정교화되는 것에 반해 만족할 만한 단계에 다다르지 못하고 있다.

여러 전원장애(disturbances) 중에서 가장 일반적인 장애 요인은 순간전압강하(voltage sag)로서, 최근 조사에 의하면 모든 장애요인(voltage sag, voltage swell, flicker and frequency change 등) 중 92%를 차지하고 있다. Voltage sag가 발생하는 주된 원인은 낙뢰나 지락 사고 등에 의한 충격이 부하에 사고를 일으켜 순간적으로 전원이 감소되는 경우이다. 그렇기 때문에 빠른 시간 내의 보상과 안정된 정상상태를 구현하는 이른바, “순간 보상”이 그 핵심이라 할 수 있겠다.

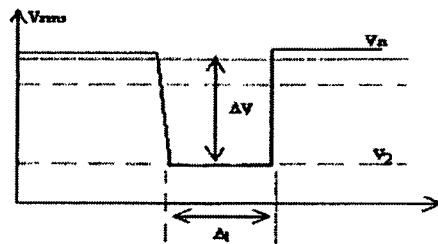
이에 본 논문에서는 전력품질에 영향을 끼치는 전원 장애요인 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 순간전압강하에 대해 알아볼 것이다. 그리고 이를 검출기 위한 방법으로 abc-dq좌표변환을 기반으로 공급전원의 전압변화를 계산하여 voltage sags를 판별하는 방법에 대해 논해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 순간전압강하(Voltage sag)

순간전압강하란 송배전 계통의 전압이상현상으로 인한 일시적인 전압강하현상으로 일반적인 정전현상과는 구분되어진다. 순간전압강하는 일반적으로 voltage sag라 불리지만 IEC(국제전기표준회의, International Electrotechnical Commission)에서는 voltage dip이라고도 불린다.

IEEE와 IEC의 규정에 따른 순간전압강하에 대한 표현은 약간의 차이가 있다. IEEE 표준에 따르면, 순간전압강하는 송배전 계통상에서 지락사고나 대용량부하의 기동으로 인해 발생하는 현상으로 0.5주기에서 1분동안 전력계통에서 전압이 rms값으로 0.1pu~0.9pu 이내로 감소하는 현상이라고 정의하고 있으며, 순간전압강하의 크기는 기준전압에 대하여 순간전압강하 후 남은 전압으로 표현한다. IEC 표준의 경우에는, 전압이 갑작스런 감소 현상 후에 0.5주기에서 수초동안의 짧은시간 동안 빠르게 전력계통에서 전압회복이 이루어지는 경우로 정의하고 있다. 그리고, 그 크기는 시스템의 규격전압에서 순간전압강하 발생시의 전압을 뺀 값으로 정의한다. 그리고 크기의 단위는 공통적으로 시스템 규격전압의 퍼센트(%)로 표현을 한다.



- IEC의 경우:  $\Delta V$   
 - IEEE의 경우:  $V2$

그림 2. 순간전압강하의 표현

2.1.1 순간전압강하가 부하에 미치는 영향

순간전압강하에 영향을 받는 기기로는 전자개폐기나 응용 가변속 모터 등이 있고, 그 크기에 영향을 받는 기기로는 의료용 전기기기나 컴퓨터 등이 있다. 따라서 우리 생활 전 분야에 걸쳐 그 영향이 끼친다고 보아도 과하지는 않을 것이다.

컴퓨터나 팩시밀리 같은 OA기기는 10~20% 이상의 전압저하가 0.003~0.02초 정도 계속되면 메모리의 손실, 프로그램 오작동, 오제어, 송수신의 정지를 초래하기 쉽다. 일반적으로 많은 컴퓨터는 프로그램 오류발생을 막기 위해 시스템을 정지한 후 재가동하고 있다. 산업현장의 프로세서 제어용 컴퓨터의 경우 정지하면 생산성에 막대한 피해를 끼치게 된다. 그리고, 공장 전동기의 대부분인 전자개폐기의 경우 50% 이상의 전압저하와 0.005~0.02초의 순간전압강하가 계속되면 전동기가 정지하게 되어 생산라인의 중단을 일으키게 될 것이다.

고압수은등은 20~30% 이상의 전압저하가 0.05~1초 정도 계속되면 소등되고, 곰 전원이 복구되어도 발광관이 냉각되어 재 점등되기까지는 수분에서 수십분이 필요하며 안정등까지는 또 수분이 필요하게 된다.

전동기 부하가 있는 일반 수용가에도 광범위하게 사용되고 있는 부족전압 계전기의 경우, 일정한 기계적 부하가 접속된 전동기의 단자전압이 저하되면 전동기는 과부하가 되어 전압강하가 커지고 구속상태로 되어 고정자 권선을 손상시킨다. 또 전원 회복 시에는 한번에 다수의 전동기가 가속되고, 이 시동전류는 계통에 큰 동요를 야기하게 되므로 부족전압이 나타나기 전에 필히 전동기를 전원에서 차단하여 보호하여야 한다.

최근 들어 사회의 고도 정보화, 자동화 흐름을 타고 컴퓨터가 확산 보급되고, 산업기술이 급속하게 발달함에 따라 생산제품의 정밀화, 첨단화의 추세가 두드러지고 있다. 이처럼 일반가정에서부터 산업계에 이르기까지 순간전압강하의 영향이 커짐에 따라 전력의 고품질 욕구가 고조되는 반면 전기의 불완전성으로 인한 직·간접적인 피해로 불만이 점점하는 실정이다. 이에 따라 전기 사용자는 경제적이고 효율적인 전력공급을 위해서 수전 측에 자체적으로 전기장애탈퇴에 대한 대응책 마련이 필요하다.

## 2.2 현존하는 보상방법

현재 전압보상을 위한 장비들이 많이 나와 있다. 이중 대표적인 Uninterruptible Power System(UPS, 무정전전원장치), Dynamic Voltage Restorer(DVR, 동적전압보상기), Superconducting Magnetic Energy Storage(SMES, 초전도 자기에너지 저장소) 등 몇몇 방법의 특징들을 간략하게 살펴보겠다.

### 2.2.1 Uninterruptible Power System (UPS, 무정전전원장치)

UPS는 순간전압강하 뿐만 아니라 순간전압상승이나 고조파까지 보상하여 성능면에서 우수하지만, 배터리의 수명이 짧고 지속적인 유지보수가 필요한 것이 큰 단점이다.

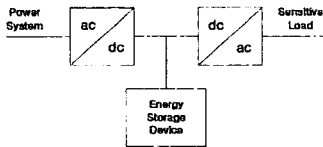


그림 3. Uninterruptible Power Supply

UPS는 인버터로 쓰이는 다이오드 정류기로 구성되어 있다. 에너지 저장은 일반적으로 DC link로 연결된 배터리 블록에서 한다. 정상적으로 동작할 때는 ac공급원으로부터의 전력은 인버터에 의해 정류되고 반전된다. 그리고 배터리는 대기상태로 남아있으며 dc전압이 일정하게 유지되게끔 한다. 순간전압강하 또는 순간정전이 발생하면 에너지는 배터리 블록에서 유지되고 있던 전압이 배출된다. 배터리 블록의 저장용량에 따라 부하에 수분 또는 수시간 동안 전압을 공급할 수 있다.

### 2.2.2 Dynamic Voltage Restorer (DVR, 동적 전압 보상기)

순간전압강하가 발생하는 동안 저장된 에너지가 변압기에 직렬로 연결되어 전압 보상을 하는 원리이다.

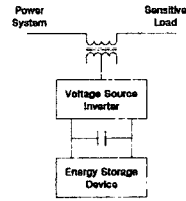


그림 4. Dynamic Voltage Restorer

이것은 크기와 위상각 그리고 주파수를 제어할 수 있는 전압이 급전선에 연결되어 있다. 따라서 sags가 발생하는 동안 부하에 전압을 공급하는 것이다. 인버터는 일반적으로 높은 스위칭 주파수의 특징을 갖는 IGBTs를 사용하기 때문에 짧은 주기에서 완벽한 보상을 구현할 수 있다.

### 2.2.3 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES, 초전도자기에너지저장소)

UPS에 추가되는 에너지 변환기에서 발생하는 손실을 피하기 위하여 보조 전력원이 대신 사용되었다.

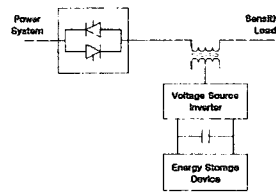


그림 5. Superconducting Magnetic Energy Storage

전원장애탈퇴가 검출되자마자 민감한 부하는 절체스위치에 의해 전력시스템으로부터 절연된다. 필요한 에너지의 충전은 배터리 또는 작은 SMES 시스템을 통해 이루어질 수 있다. 이 중 SMES가 배터리보다 크기를 더 줄일 수 있고, 더 작은 유지보수가 필요한 점에서 유리하다.

## 2.3 DQ좌표변환(DQ transformation)

임의의 3상 변수를 서로 직교하는 2상 변수로 나타내는 dq 좌표변환 형태가 제어에는 일반적으로 사용되어 지는데, 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.

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

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

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

정지좌표계의 dq성분을 전원전압과 같은  $\omega=2\pi(\theta=\omega t)$ 의 각속도로 회전하는 동기좌표계로 변환하기 위해서 정지 좌표축과 동기좌표축상의 변수 사이에는 식 (3)과 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 대입하면 동기좌표계로 변환되고, 다음과 같이 나타난다.

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

### 2.3.1 시뮬레이션 및 결과

순간전압강하를 검출하기 위한 시뮬레이션 방법으로 그림6과 같이 Matlab Simulink를 이용하여 block diagram을 구성하였다.

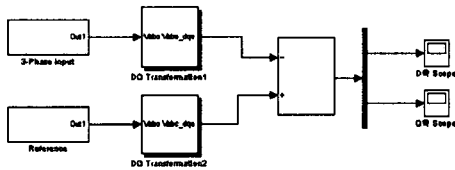


그림 6. Voltage disturbances detection block diagram

3상이 전부 순간전압강하가 일어난 경우와 1상만 순간전압강하가 일어난 경우를 각각 입력부에 인가하였다. 이 abc 3상 전압의 dq 변환 값과 정상상태전압(reference)의 dq변환 값의 차를 통해 순간전압강하 발생을 검출하게 하는 원리이다.

$$V_{err} = V_{ref, dqe} - V_{in, dqe} \quad (5)$$

3상 전원이 다음과 같이 주어졌다고 하자.

$$\begin{aligned} V_a(t) &= V_m \sin \omega t \\ V_b(t) &= V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c(t) &= V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ V_m &= 220[V], \quad \omega = 2\pi \times (60)[rad/s] \end{aligned} \quad (6)$$

그리고, 식(7), (10)과 같은 순간전압강하가 발생하였다 가정하고 dq성분을 식(1)에 의해 계산해보면 식(8), (11)과 같이 구해진다. 식(9), (12)는 각각의 경우의  $V_{err}$  값이다.

i) 3상 모두 50%의 순간전압강하 발생의 경우

$$V_a' = \frac{1}{2} V_a, \quad V_b' = \frac{1}{2} V_b, \quad V_c' = \frac{1}{2} V_c \quad (7)$$

동기좌표계( $\theta=\omega t$ )에서,

$$V_d = 0, \quad V_q = \frac{1}{2} V_m \quad (8)$$

의 직류값을 가진다.

$$V_{err} = V_{ref, dqe} - V_{in, dqe} = V_m - \frac{1}{2} V_m = \frac{1}{2} V_m > 0 \quad (9)$$

ii) 1상에서만 50%의 순간전압강하 발생의 경우

$$V_a' = \frac{1}{2} V_a, \quad V_b' = V_b, \quad V_c' = V_c \quad (10)$$

동기좌표계( $\theta=\omega t$ )에서,

$$V_d = -\frac{V_m}{6} \sin 2\omega t, \quad V_q = \frac{5}{6} V_m + \frac{V_m}{6} \cos 2\omega t \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_{err} &= V_{ref, dqe} - V_{in, dqe} \\ &= V_m - \frac{5}{6} V_m - \frac{V_m}{6} \cos 2\omega t = \frac{1}{3} V_m \sin^2 \omega t > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

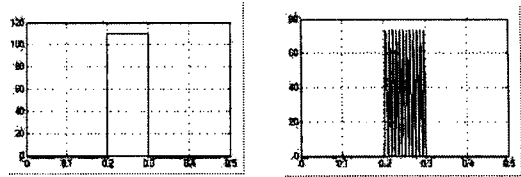


그림 7. 3상평형, 불평형시스템에서의  $V_{err}$  비교

그림 7은 그림 6의 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과로서 수식을 통한  $V_{err}$ 과 시뮬레이션을 통한 값이 일치함을 알 수 있다.

## 3. 결 론

전원장치의 가장 큰 부분을 차지하는 순간전압강하의 보상은 전력품질향상에 있어서 가장 중요한 과제이다. 이에 본 논문에서는 순간전압강하의 특성과 부하에 미치는 영향을 알아보았다. 그리고 전압보상을 위해 현재 나와있는 보상기의 특징들을 간략하게 살펴보았으며, 마지막으로 DQ변환을 이용한 순간전압강하 검출의 시뮬레이션을 해보았다.

전력품질의 향상을 위해서 가장 먼저 진행되어야 하는 것은 전원장치의 검출이다. 본 논문에서 다룬 DQ좌표변환은 빠르고 효율적으로 전압의 이상을 감지할 수 있다. 그리고 3상평형, 불평형 시스템의 경우를 각각 시뮬레이션해봄으로써 그 정확성을 보여주었다. 또한 본 논문에서는 다루지 않았으나 DQ좌표변환을 이용하여 순간전압강하의 검출도 쉽게 구할 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Montero-Hernandez, O.C, Enjeti, P.N, "Ride-through for critical loads. Exploring a low-cost approach to maintaining continuous connections between buildings and/or industrial systems", IEEE Industry Applications Magazine, Vol.8, pp.45-53, 2002
- [2] Montero-Hernandez, O.C, Enjeti, P.N. "A fast detection algorithm suitable for mitigation of numerous power quality disturbances", Industry Applications Conference, 2001. 36th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE, Vol.4, pp.2661-2666, 2001
- [3] Bollen, M.H.J. "Voltage sags in three-phase systems", IEEE Power Engineering Review, Vol.21, pp.8-11, 15, 2001
- [4] Sannino, A, Miller, M.G, Bollen, M.H.J, "Overview of voltage sag mitigation", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Vol.4, pp.2872-2878, 2000
- [5] Alves, M.F, Ribeiro, T.N. "Voltage sag: an overview of IEC and IEEE standards and application criteria", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE, Vol.2, pp.585-589, 1999
- [6] Bollen, M.H.J, Styvaktakis, E. "Tutorial on voltage sag analysis", Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference, Vol.1, pp.193-194, 2000
- [7] 최현영, 류형선, 오세호, 박정균, 김양모, "부하에 따른 voltage sag의 특성 분석", 2001년도 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp.236-238, 2001

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