

대용량 전동기 기동시 배전계통의 순간전압강하 발생사례 분석

(An Analysis the Distribution Power System Voltage Sag Case by a High Capacity Motor Connection)

박용업* · 이건행

(Yong-Up Park · Keon-Hang Lee)

Abstract

Recently, the KEPCO is constructing the PQMS(Power Quality Monitoring System) each of the distribution line and will establish the voltage sag standard based on the long time measurement data of PQMS. The voltage sag prospect is difficult for the power system manager, however, the voltage sag forecasted is very important because the damage effect of the voltage sag is very broad. This paper describes the prospect formula of the voltage sag magnitude in the PCC(Point Common Coupling) by the starting current when the high capacity equipment is connected with the distribution line. To achieve this, this paper has proposed the sag prospect formula revision of KEPCO for the reliability improvement and the proposed formula has been applied the voltage sag real case to inspect the calculation procedure and reliability.

Key Words : Voltage Sag, Prospect Formula, IEEE/IEC Std.

1. 서 론

본 논문에서는 배전계통에 대용량기기가 연계되었을 때, 기동전류로 인한 연계점의 전압강하 예측계산식을 제안하였다. 일반적으로 배전계통 순간전압강하의 주요원인은 자연재해, 시설물의 외부접촉, 조류로 인한 고장 등 인위적으로 제어할 수 없는 외부요인에 의한 고장이 대부분이어서 사전에 이에 대한 예측을 통하여 완전하게 방지하는 것은 한계가 있다. 이 밖에

1선 지락 고장시 고장선로의 재폐로에 의해 인근선로에서 순간전압강하가 발생하게 되는데, 현장 여건상 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 재폐로 방식을 변경하는 것은 불가능하다[1]. 그러나 대용량기기 연계에 따른 순간전압강하는 사전 예측이 가능하므로, 이에 대한 내용을 충분히 검토하여 정전현상을 방지하는 것이 매우 중요하다. 현재 순간전압강하는 KEPCO의 배전자동화시스템에 이벤트 기록이 되지 않으며, 수용가 내부에도 이에 대한 모니터링 시스템이 구비되어 있지 않아 실제로 배전계통에서 발생되고 있는 순간전압강하 현황 및 분석이 불가능한 실정이다. 이에 대한 근본적인 대책수립을 위해서, 현재 KEPCO에서는 각 회선별 전기품질 상시 모니터링시스템 구축

* 주저자 : 한전 전력연구원 송배전연구소 선임보연연구원
Tel : 042-865-5956, Fax : 042-865-5944
E-mail : upup22@kepco.co.kr
접수일자 : 2010년 8월 12일
1차심사 : 2010년 8월 14일, 2차심사 : 2010년 8월 30일
심사완료 : 2010년 9월 14일

을 추진 중에 있으며, 차후 이에 대한 장기간의 측정데이터에 근거한 회선별 순간전압강하 관리방안을 수립할 계획이다.

2. 배전계통 순간전압강하 국제표준

2.1 순간전압강하 정의 및 관리기준

IEC에서 순간전압강하는 전력계통의 특정지점에서 설정된 전압경계치 이하로 전압이 감소하는 현상으로 정의하고 있다. 일반적으로 순간전압강하는 단락고장 또는 대용량 부하의 구동과 같이 급격한 전류증가의 발생 및 소멸과 관련되며, 전압크기와 지속시간이라는 2차원적 전자기 외란 특성을 가지고 있다. IEC 및 IEEE Std.에서 정의하는 순간전압강하 및 상승에 대한 지시값은 아래 표와 같다[2-3].

표 1. IEEE/IEC 전압변동 지시값
Table 1. IEEE/IEC Voltage variation value

Categories	Duration	Magnitude
Short duration variations(IEEE)		
Instantaneous		
Sag	0.5~30cycle	0.1 ~ 0.9[pu]
Swell	0.5~30cycle	1.1 ~ 1.8[pu]
Momentary		
Interruption	0.5cycle~3s	< 0.1[pu]
Sag	30cycle~3s	0.1 ~ 0.9[pu]
Swell	30cycle~3s	1.1 ~ 1.4[pu]
Temporary		
Interruption	3s~1min	< 0.1[pu]
Sag	3s~1min	0.1 ~ 0.9[pu]
Swell	3s~1min	1.1 ~ 1.2[pu]
Short variations(IEC)		
Interruption	0.5~30cycle	< 0.1[pu]
Dip(Sag)	0.5~30cycle	0.1 ~ 0.9[pu]
Swell	0.5~30cycle	1.1 ~ 1.8[pu]

2.2 순간전압강하 관리지수(SARFIx)

순간전압강하를 표현하는데 있어 ‘70[%] 순간전압강하(70[%] Sag)’는 배전계통의 실효치 전압의 크기가 공칭전압의 70[%]만큼 감소 또는 0.3[pu]가 됨을 의미한다. 순간전압강하에 대한 대표적인 관리지수로 SARFIx가 있으며, 산출 수식은 다음과 같다.

$$SARFI_{\%v} = \frac{N_i}{N_T} \quad (1)$$

여기서 [%v]는 전압한계를 나타내며, 140, 120, 110, 90, 80, 70, 50, 10으로 주어지고 SARFIx 지수는 총 고객 수에 대해, 이를 위반하는 고객 수의 비로 주어진다. 단일 사이트의 경우에 SARFIx 지수는 전기품질 모니터링 기간 동안에 발생한 순간전압변동에 대하여 한계전압 [%V]보다 높아지거나, 낮게 떨어지는 순간전압변동의 평균횟수를 나타낸다. SARFIx 지수는 일반적으로 전력계통의 신뢰도 평가에 사용되는 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)와 유사한 방식으로 산출되지만, SAIFI가 일시정전을 대상으로 하는데 반해 SARFIx는 순간전압변동을 다루고 있다.

3. 대용량기기 연계시 전압강하 계산식

3.1 현행 계산 수식(KEPCO)

현재 KEPCO의 순간전압강하 산출에 사용되는 최대전압 강하율의 계산식은 다음과 같다[4].

$$\Delta V_{\max} = \frac{Q_{\max}}{P_s} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$Q_{\max} = \frac{P_f}{X_s + X_l + X_f} \times 100 \quad (3)$$

여기에서 수식 (2)의 ΔV_{\max} 는 규제지점의 최대전압강하율, 수식 (3)의 Q_{\max} 는 단락시 최대무효전력, P_s 는 단락용량, P_f 는 로변압기의 정격용량, X_s 는 규제지점

에서 전원측으로 본 %임피던스, X_f 는 변압기의 %임피던스, X_f 는 전기로 %임피던스로 정의되어 있다.

3.2 개정 수식

KEPCO의 현행 순간전압강하 산출 수식은 규제지점에 대한 구체적인 정의가 없어 [%]임피던스 산출에 혼란을 가져올 수 있다. 본 절에서는 이에 대한 문제를 보완하고자 다음과 같은 계산식을 도출하였다. 제안된 수식은 그림 1과 같은 회로에서 수식 (4)~(7)과 같은 전제조건을 갖는다. 또한 전압기준은 송전단전압을 적용하는 것으로 가정한다.

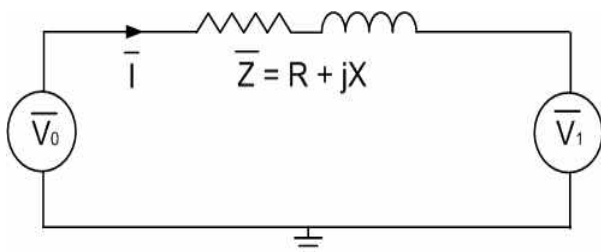


그림 1. 수식 전개를 위한 공급 및 수전전압 개요
Fig. 1. Concept of the supply & receive voltage for the formula development

○ $\overline{V}_0 = V_0 \angle 0$ (4)

○ $\overline{V}_1 = V_1 \angle -\delta$ (5)

○ $\overline{I} = I \angle \theta$ (단, $\theta < 0$) (6)

○ $\overline{Z} = R + jX$ (7)

전압강하율의 정의로부터 수식 (8)이 성립되며, 전달되는 전력량은 수식 (9), (10)과 같이 계산된다.

$$\Delta V_{\max} (\%) = \frac{|\overline{V}_0| - |\overline{V}_1|}{|\overline{V}_0|} \times 100 \quad (8)$$

$$\overline{S} = \overline{V}_0 \overline{I}^* = P + jQ \quad (9)$$

$$\overline{V}_0^* \overline{I} = P - jQ \quad (10)$$

V_0 의 위상각이 0이므로 $\overline{V}_0^* = \overline{V}_0 = V_0$ 이 되고, 이를 이용하면 수식 (11)이 성립된다.

$$\overline{I} = \frac{P - jQ}{V_0} \quad (11)$$

또한 그림 1의 회로에서 공급점과 수전점의 전압은 $\overline{V}_0 = \overline{V}_1 + \overline{I} \overline{Z}$ 과 같이 표현할 수 있으며, 여기에 식 (11)을 대입하면 (12)와 같이 유도된다.

$$\overline{V}_0 = \overline{V}_1 + \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_0} \quad (12)$$

그림 1에서 ΔV 는 전원전압과 말단전압과의 차이를 의미하므로 이를 정리하면 수식 (13)과 같이 유도되며, 양 변을 V_0 나누어 주면 수식 (14)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta V &= |\overline{V}_0| - |\overline{V}_1| \\ &= |\overline{V}_0| - \left| \overline{V}_0 - \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_0} \right| \\ &= V_0 - \left| V_0 - \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_0} \right| \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V_0} &= 1 - \left| 1 - \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_0^2} \right| \\ &= 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{RP + XQ}{V_0^2}\right)^2 + \left(\frac{XP - RQ}{V_0^2}\right)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

한편 매우 작은 x 에 대해서 다음과 같은 근사화가 가능하므로 수식 (13)은 수식 (15)와 같이 근사화된다.

○ $(1 + x)^2 \approx 1 + 2x$

○ $\sqrt{1 + 2x} \approx 1 + x$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V_0} &\approx 1 - \sqrt{1 - \frac{2(RP + XQ)}{V_0^2}} \\ &\approx 1 - \left(1 - \frac{RP + XQ}{V_0^2}\right) = \frac{RP + XQ}{V_0^2} \end{aligned} \quad (15)$$

이것을 백분율로 표시하면 수식 (16)과 같이 된다.

$$\Delta V_{\max}(\%) = \frac{RP + XQ}{V_0^2} \times 100(\%) \quad (16)$$

R과 X는 선로 임피던스의 저항성분과 리액턴스 성분을 의미하며, 일반적으로 X/R 비가 5보다 큰 경우 R을 무시할 수 있다. 이 경우 위 식 (16)은 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta V_{\max}(\%) \approx \frac{XQ}{V_0^2} \times 100(\%) \quad (17)$$

여기에서 우변의 분자와 분모를 각각 X로 나누게 되면 다음과 같다.

$$\Delta V_{\max}(\%) \approx \frac{Q}{V_0^2/X} \times 100(\%) \quad (18)$$

Q는 부하에서 소모되는 무효전력량(Var)을 의미하며 분모(V_0^2/X)는 바로 단락용량을 의미한다. 그러므로 수식 (18)은 다시 아래와 같이 정리된다.

$$\Delta V_{\max}(\%) = \frac{Q_{\max}}{S_{sc}} \times 100(\%) \quad (19)$$

위에서 각 변수의 단위를 %단위로 변경하면 수식 (20), (21)과 같이 유도된다.

$$RP = \left(\frac{\%R \times V_b^2}{S_b \times 100}\right) \left(\frac{\%P \times S_b}{100}\right) = \frac{\%R \%P V_b^2}{10,000} \quad (20)$$

$$XQ = \frac{\%X \%Q V_b^2}{10,000} \quad (21)$$

송전단 전압(V_0)을 기준전압(V_{base})이라 가정하고 위의 두 식 (20), (21)을 이용하여 전개하면,

$$\begin{aligned} \Delta V_{\max}(\%) &= \frac{RP + XQ}{V_0^2} \times 100 \\ &= \frac{\%R \%P + \%X \%Q}{100} \end{aligned} \quad (22)$$

최종적으로 도출된 수식 (22)로부터 알 수 있듯이 기기 연계점의 전압강하를 결정하는 것은 부하의 P와 Q, 그리고 선로의 [%Z]이다. 결국 대용량기기가 연계되었을 때 이에 대한 전압강하를 예측하기 위해서는 운전중인 부하의 소모전력(VA)과 역률을 알아야 한다.

4. 대용량 전동기 연계시의 순간전압 강하 발생사례 분석

본 절에서는 대용량 전동기가 배전선로에 연계되어 변전소의 저전압 계전기가 동작한 실사례에 현행 수식 및 전절에서 유도된 개정 수식을 적용하여 연계점에서의 전압강하를 계산해 보았다.

4.1 배전계통 조건 및 대용량 전동기 사양

대용량 전동기를 사용하는 수용가의 계약용량은 40,000[kW]이며, 대용량 배전방식 2회선 전용선로로 전력을 공급받고 있다. 배전계통 및 대용량 전동기에 대한 조건은 아래의 표 2, 3과 같다[5].

표 2. 배전계통 조건
Table 2. Condition of the distribution system

MTR	결선방식	Y-Y-Δ
	1-2[%Z]	15.57
1-3[%Z]	8.46	
2-3[%Z]	2.23	
선종	CNCV-W 22.9kV 600SQ	
선로임피던스	정상분(Ω/km)	0.0736+j0.1277
	영상분(Ω/km)	0.1546+j0.0669

표 3. 연계기기 조건
Table 3. Condition of the connected equipment

Type	농형 유도전동기
기동방식	콘돌과 기동방식
Rated output	15,300[kW]
Voltage	11,000[V]
Speed	1,188[rpm]
Current	919[A]

4.2 전동기 기동시 전압강하 계산 및 모의

4.2.1 현행 산출 수식 적용

현재 KEPCO에서 적용되고 있는 연계점에서의 순간전압강하 산출 수식에 근거하여 계산하면 아래 표 4와 같이 나타난다.

표 4. 연계점 전압강하 크기(현행)
Table 4. The voltage drop magnitude of the equipment connected point(present formula)

P_s	247[MVA]
Q_{max}	471.7[KVAR]
ΔV_{max}	19.01[%]

4.2.2 개정 산출 수식 적용

계통 조건 및 전동기 특성에 근거하여 개정 산출 수식에 적용하여 계산하면 아래 표와 같이 전동기 기동 전류는 1,050[A] 정도이며, 이로 인한 변전소 모선에서 발생하는 전압강하 크기는 1,905[V] 정도로 산출된다.

또한 전동기 기동시 수용가 공급점에서의 전압강하는 다음과 같다. 이 때 전철에서 제시한 전압변동 예측값 적용을 위한 기동 역률은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용한 시뮬레이션에 의해서 산출되었다.

표 6과 같이 개정된 수식에 의하면 연계점에서 전동기 기동시 정격전압 대비 25.9[%]의 순간전압강하가

발생하는 것으로 계산되었다. 이는 현장에서 측정된 전압강하의 크기와 거의 일치하며, 해당설비에 안정적인 전압 공급이 불가능하여 전동기 기동이 불가능하였다. 이로 인하여 해당설비의 수전전압을 154[kV]급으로 변경하였는데, 변압기의 전압, 전류비를 고려할 때 연계시 발생하는 전압강하는 1[%] 미만으로 예측된다.

표 5. 기동전류 및 모선의 전압강하 크기
Table 5. The starting current & voltage drop magnitude of the distribution bus

주변압기 임피던스	[%]XB	34.6
	Z[Ω]	1.8144
기동전류 예측치	1,050A(정격전류의 240[%])	
모선 상전압강하	1,905[V]	

표 6. 연계점 전압강하 크기(개정)
Table 6. The voltage drop magnitude of the equipment connected point(revision formula)

연계점 임피던스 [%Z]	선로	2.807+j4.8702
	주변압기	34.6
	수전변압기	25.0
기동역률	0.33	
기동용량	2.88[Ω]	
연계점 전압강하	[(2.901×41.817×0.33)+ (68.795×41.817×0.944)]/100 = 25.9[%]	

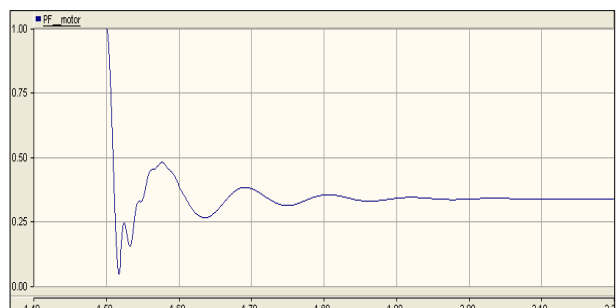


그림 2. 기기 기동 역률
Fig. 2. The starting PF of the equipment

현행 수식과 개정 수식의 계산 결과값 차이는 수식에 적용되는 함수가 다르고, 일부 항목의 실패데이터 수집이 불가능하여 임의의 값을 적용하여 발생된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 KEPCO에서 사용하고 있는 순간전압강하 산출식에 대한 개정 수식을 제안하였다. 순간전압강하는 전력계통 운영자가 예측하기 힘든 현상이지만, 이와 같이 대용량기기 운전으로 인한 순간전압강하는 충분히 예측이 가능하다. 순간전압강하는 송전 및 배전계통에서 항상 발생하는 현상이므로, 국내와 같이 부하기기에 대한 순간전압강하 내성레벨이 제정되어 있지 않은 조건에서 이에 대한 방지대책은 매우 중요한 사항이다. 본 논문에서 제시된 산출식은 사례별 적용을 통한 추가 검증 후, KEPCO의 순간전압강하 관리기준에 적용할 예정이다.

References

- [1] 배전시스템에서의 재폐로에 의한 수용가측 영향의 정량적 평가, 한국조명전기설학회 논문지, Vol.12, No.2, 1998.
- [2] IEEE Std. 1159, 'IEEE Recommended Pracrice for Monitoring Electric Power Quality', 1995.
- [3] European Standard EN 50160, 'Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems', 2005.
- [4] 한국전력공사, 영업업무처리지침.
- [5] ABB, Technical Specification Induction Motor.

◇ 저자소개 ◇



박용업 (朴用業)

1976년 7월 19일생. 2005년 강원대학교 전기전자공학부 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임보연구원.



이건형 (李健行)

1966년 6월 21일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1999년~2007년 한전 배전처 근무. 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 책임연구원.