

# 회전기의 기여에 의한 시변성의 순간전압강하 예측에 관한 연구

論 文

54A-6-7

## Investigation of the Estimation of Time-Varying Voltage Sags Considering the Short Circuit Contributions of Rotating Machines

尹 尙 潤<sup>†</sup>  
(Sang-Yun Yun)

**Abstract** - In this article, I would like to explore the estimation method of time-varying voltage sags in large industrial systems considering the short circuit contributions of rotating machines. For the power distribution system of KEPCO(Korea Electric Power Corporation), the magnitude of initial symmetrical short circuit current is generally not changed. However, in industrial systems which contain a number of rotating machines, the magnitude of voltage sag is generally changed from the initial to the clearing time of a fault due to the decreasing contribution of rotating machines for a fault current. The time-varying characteristics of voltage sags can be calculated using a short circuit analysis that is considered the time-varying fault currents. For this, the prediction formulations of time-varying voltage sags are proposed using a foreign standard. The proposed method contains the consideration of generator and motor effects. For the test of proposed formulations, a simple system of industrial consumer is used for the comparison conventional and proposed estimation method of voltage sag characteristics.

**Key Words** : Time-Varying Voltage Sags, Short Circuit Analysis, IEC 60909, Distribution Systems

### 1. 서 론

컴퓨터상의 전력 장애에 대한 T.S. Key의 연구 결과[1]가 발표된 이후로 순간전압강하(voltage sag)의 특성 값을 추정하기 위한 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 순간전압강하의 특성이라 하면 그 크기(magnitude)와 지속시간(duration)을 가장 중요하게 인식하는 것이 일반적이다.

순간전압강하의 특성을 추정하기 위한 방법은 크게 두 가지로 나뉘볼 수 있다. 하나는 파형을 직접 감시(monitoring)하는 것[2-4]으로 직관적인 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 순간전압강하의 파형을 취득하는 것은 많은 상용 제품이 나와 있을 정도로 현재 기술적으로는 문제가 없으나 관심의 대상이 수용가내지 수용가의 부하이므로 많은 설치 장소와 이에 따른 경제적 부담 때문에 보편적으로 사용하기에 힘든 측면이 있는 것이 사실이다. 다른 하나의 방법은 고장해석을 응용하여 그 특성을 추정하는 방법이다. IEEE 493규격(The Gold Book)[5]에서 제시하고 있는 고장제거 동안의 특성 추정 방법은 아직까지도 많은 연구에서 참고하는 방법이다. 이것은 순간전압강하 크기는 단락회로해석(short circuit analysis)에 의해 계산하며 지속시간은 보호기기의 동작 시간에 의해 추정하는 방법이다. IEEE 493 규격이 3상 단락 고장에 초점을 맞추고 있는 반면 Zhang과 Bollen은 대칭좌표법(symmetrical component analysis)을 이용하여 불

평형 고장에 대한 순간전압강하 특성을 분석하였다[6].

참고문헌 [5] 이후로 순간전압강하의 크기는 상수값(constant value)으로 취급되는 것이 일반적이었다[7,8]. 이것은 고장전류가 시간에 따라 변화하지 않는다는 가정을 하고 있는 것으로 일반적으로 전력회사 소유의 배전계통에서는 수용할 수 있는 이론이다. 그러나 대형 전동기 및 분산 발전기 등이 설치된 대형 수용가 계통에서는 회전기의 고장 기여에 의한 고장전류 변화를 무시할 수 없으며 따라서 순간전압강하의 크기는 시간에 따라 변화할 수 있다.

본 논문에서는 현재까지 주목하지 않았던 회전기의 단락 기여에 의한 시변성의 순간전압강하 특성 평가 방법을 제안하였다. 일반적으로 순간전압강하의 발생원인을 대형 전동기의 기동에 의한 것도 있다고 보고 있으나 본 논문에서는 계통상의 고장 발생에 의한 것으로 국한하였다. 제 2장에서는 시변성의 순간전압강하의 발생 메커니즘에 대해 설명하였다. 제 3장에서는 시변성의 순간전압강하 크기 및 지속시간의 추정 방법을 제시하였다. IEC 규격의 고장해석 방식을 이용하여 회전에 의한 시변성의 순간전압강하 특성이 수식화되었다. 제 4장에서는 기존 및 제안 방식의 순간전압강하 특성 예측의 차이점을 비교하기 위해 간단한 산업용 수용가의 시험 계통에 대한 사례연구가 수행되었다.

### 2. 시변성의 순간전압강하 발생 메커니즘

순간전압강하의 일반적인 정의는 계통상의 부하에 대한 갑작스런 전압의 저감현상이라고 정리할 수 있으며 그 세부적인 용어 및 구분은 대표적으로 참고문헌 [9]에 언급되어 있다. 순간전압강하의 발생원인은 일반적으로는 계통내의 고장 내지 대형 부하의 갑작스런 계통 투입을 들 수 있으나

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : LS産電 電力研究所 先任研究員・工博

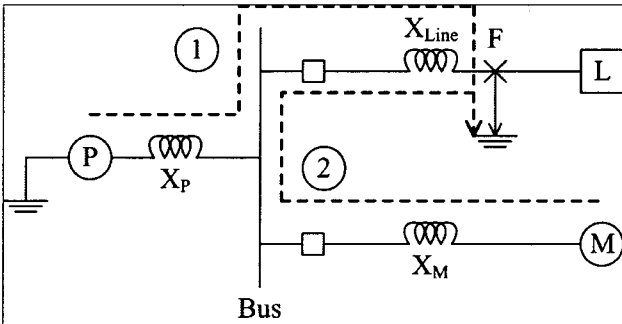
E-mail : syyun@lsis.biz

接受日字 : 2005年 3月 11日

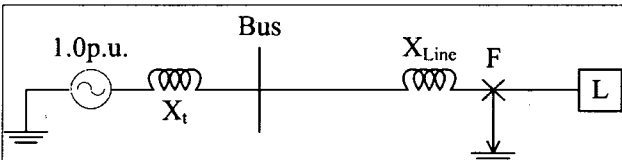
最終完了 : 2005年 5月 29日

앞서 언급한 것처럼 본 논문에서는 고장에 의한 원인으로 제한한다. 그림 1(a)와 같은 예제 계통에서 3상 단락(short circuit)이 발생했다고 가정한다. 이 경우 고장에 대한 기여는 모두 2곳으로부터 발생한다. 하나는 전력회사 측의 등가 계통으로부터의 고장전류 기여이며 나머지 하나는 계통내부의 회전기(M, motor)에 의한 고장기여이다.

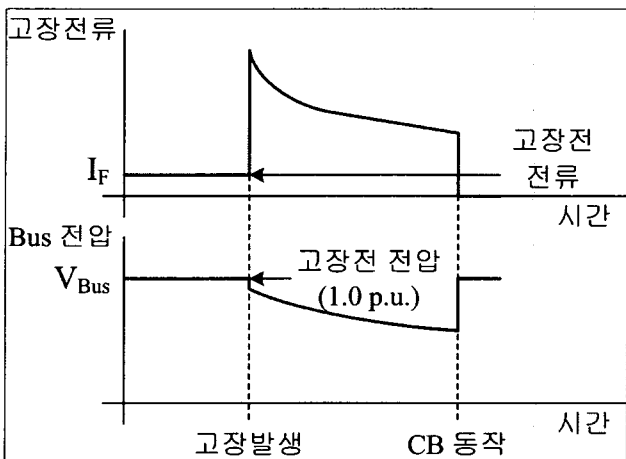
무한모선에 의한 기여분은 고장 회로를 CB1이 끊기 전까지 지속적으로 유입되나 회전기에 의한 기여분은 초기에 높은 기여분을 가지며 시간이 지날수록 감소한다. 발전기의 경우는 초기에 높은 고장기여를 하고 어느 정도 시간이 흐르면 정상상태 고장 기여분을 출력하며 전동기의 경우는 일정 시간 후에 고장 기여가 중단된다. 그림 1(a)의 고장회로를 등가화하면 그림 1(b)와 같게 된다. 그림 1(a)의 ①는 전력회사 측에서 공급되는 전원을 의미하며  $X_p$ 는 예제 계통의 "Bus"에서 바라본 전력회사 측 계통의 테브낭(Thevenin) 등가 임피던스를 의미한다. 또한  $X_{Line}$ 은 부하까지 전력을 공급하는 선로(line)의 임피던스를 나타낸다.



(a) 예제 계통의 고장



(b) 등가회로로 변환



(c) 고장제거 동안의 전류 및 전압 실효치 파형

그림 1. 고장 제거 동안의 순간전압강하 발생

Fig. 1. Occurrence of the voltage sag during a fault clearing

고장점 F에서의 고장전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_F(p.u.) = \frac{V_p}{X_i + X_{Line}} \quad (1)$$

여기서  $X_i(p.u.) = (X_p X_M) / (X_p + X_M)$ 이며  $X_p(p.u.)$ 는 일정하고  $X_M(p.u.)$ 은 일반적으로 시간이 지남에 따라 커지게 된다(차과도 리액턴스에서 시간에 지남에 따른 임피던스 변화). 따라서  $X_i$ 값은 고장 초기에는 상대적으로 작은 값을 가지다가 시간이 지남에 따라 상대적으로 점점 커지게 된다. 또한  $V_p$ 는 전력회사 측의 등가 계통으로부터 공급되는 전압을 의미하며 일반적으로는 그림 1(b)와 같이 1.0(p.u.)로 가정하므로 고장전류의 대칭분 실효치  $I_F$ 는 초기에 상대적으로 큰 값을 가지며 시간이 지남에 따라 점차로 그 크기가 작아지게 된다. 고장전류의 대칭분 실효치의 변화를 개략적으로 표현하면 그림 1(c)의 상단 그림과 같다. 물론 이 경우 무한모선 쪽의 단락용량이 매우 큰 경우 상대적으로  $X_p$ 가 매우 작아지므로 고장전류의 대칭분 감소의 영향은 매우 작다. 이러한 감소는 일정 시간이 지나면  $X_i$ 가 일정한 상태인 고장전류의 정상상태(steady state)가 된다. 식 (1)을 이용하여 고장 시 Bus의 전압을 계산하면 다음과 같다.

$$V_{Bus} = V_p - X_i I_F = V_p \left( \frac{X_L}{X_i + X_L} \right) \quad (2)$$

여기서  $X_L$ 은 일정하므로  $X_i$ 의 크기에 따라 그림 1(b)의 "Bus"의 전압  $V_{Bus}$ 가 변화하게 된다. 식 (1)의  $X_i$ 의 정의에서 보는 바와 같이  $X_p$ 는 일정하며  $X_M$ 은 시간이 지남에 따라 점점 커지므로  $X_i$ 값은 고장 초기에 비해 시간이 지남에 따라 상대적으로 커지게 된다. 또한  $V_p$ 값은 일정하므로  $V_{Bus}$ 는 식 (2)의 정의에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라 고장 초기에 비해 상대적으로 점점 작아지게 된다. 이것은 그림 1(c)에 도시되었다. 물론 이 경우도 무한모선 쪽의 단락용량이 매우 커서 상대적으로  $X_p$ 가 매우 작은 경우나  $X_L$ 이 무척 클 경우 이러한 감소의 영향은 매우 작을 수 있다.

### 3. 순간전압강하의 특성 추정 방법 제언

고장 전류에 의해 발생한 순간전압강하의 지속시간은 대부분의 연구들에서 공통적으로 보호기기의 동작 시간에 의해 결정된다고 보는 것이 일반적이다. 만일 어떤 보호기기가 고장이 발생한 후 5주기(cycles) 만에 트립 및 차단기 접점의 개로(open)가 완료되었다면 순간전압강하의 지속시간은 약 5주기 정도가 될 것이다. 그러나 순간전압강하의 크기의 경우는 크게 두 가지 방법으로 추정방식이 나뉘고 있다. 하나는 파형의 직접 감시를 이용한 것이고 다른 하나는 고장 전류를 이론적으로 해석하여 추정하는 방식이다. 본 논문에서는 고장 전류의 이론적 해석을 이용한 방식을 다루었다.

#### 3.1 기존 방식의 순간전압강하 특성 추정

기존 방식의 경우 순간전압강하의 크기는 초기값이 그 지

속시간 동안에 일정하게 유지된다고 보는 방법이다. 따라서 계통의 구성을 식 (3)과 같은  $Z_{bus}$  행렬로 표시할 수 있다. 식 (3)에서

$$Z_{bus}^i = \begin{pmatrix} Z_{11}^i & Z_{12}^i & \dots & Z_{1k}^i & \dots & Z_{1N}^i \\ Z_{21}^i & Z_{22}^i & \dots & Z_{2k}^i & \dots & Z_{2N}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1}^i & Z_{k2}^i & \dots & Z_{kk}^i & \dots & Z_{kN}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1}^i & Z_{N2}^i & \dots & Z_{Nk}^i & \dots & Z_{NN}^i \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $i(=1, 2, 0)$ 는 대칭분 성분을 나타내며 1은 정상분, 2는 역상분, 0은 영상분을 나타낸다. 여기서  $Z_{bus}$ 는 시간에 대해 변화하지 않는 일정 값을 나타내며 발전기 및 전동기의 경우라면 차과도 임피던스 값을 이용하여 구성한다. 따라서 이를 이용하여 임의의 모선  $k$ 에 대한 고장 종류 별 대칭분 고장전류  $I_{kf}^1, I_{kf}^2$  및  $I_{kf}^0$ 를 계산할 수 있다. 따라서 임의의 모선  $j$ 에서의 초기 대칭성분 전압은 식 (4)와 같이 표현되며 임의의 모선  $j$ 에서의 각 상의 최종전압은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{jf}^0 &= -Z_{jk}^0 I_{kf}^0 \\ V_{jf}^1 &= V_{kj} - Z_{jk}^1 I_{kf}^1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{jf}^2 &= -Z_{jk}^2 I_{kf}^2 \\ \begin{pmatrix} V_{jf}^A \\ V_{jf}^B \\ V_{jf}^C \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{jf}^0 \\ V_{jf}^1 \\ V_{jf}^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

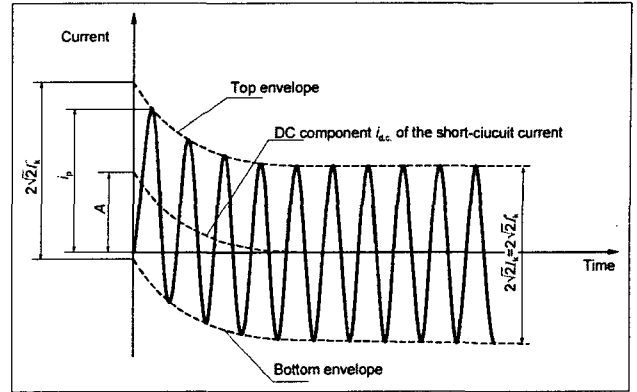
여기서  $A, B,$  및  $C$ 는 각 상을 의미하며  $a$ 는  $1\angle 120^\circ$ 를  $a^2$ 은  $1\angle 240^\circ$ 의 벡터를 나타낸다. 최종적으로 임의의 모선  $j$ 에서의 각 상의 순간전압강하 크기  $M_{Vs}$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{Vs}^A &= (1 - V_{jf}^A) \times 100\% \\ M_{Vs}^B &= (1 - V_{jf}^B) \times 100\% \\ M_{Vs}^C &= (1 - V_{jf}^C) \times 100\% \end{aligned} \quad (6)$$

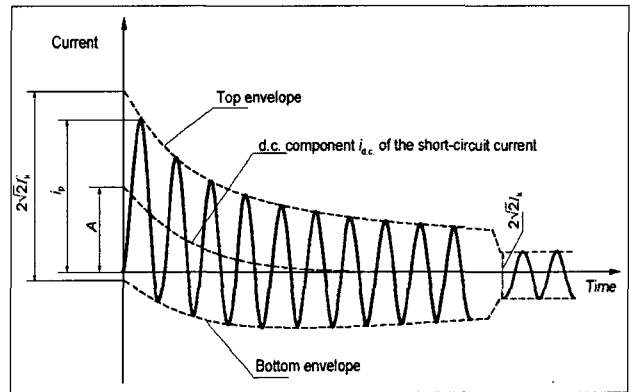
식 (6)에서 볼 수 있는 것처럼 기존 방식의 순간전압강하 크기는 고정값을 사용하고 있다. 그러나 앞서 언급한 것처럼 회전기의 고장기여의 변화에 따라 순간전압강하의 크기는 변화된다.

### 3.2 IEC 60909 규격을 이용한 단락회로 해석

시변성의 순간전압강하를 추정하기 위해서는 시간에 따른 단락회로의 분석이 요구된다. 단락회로 분석은 회로의 미분방정식 해석으로 가능하다[10]. 그러나 복잡한 지로별로 미분방정식을 구성한다는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 실무적으로 활용이 가능한 방법이 발표되었으며 대표적으로 IEEE 141 규격(IEEE Red Book)[11]과 IEC 60909 규격[12]을 들 수 있다. IEEE 규격에 비해 IEC 60909 규격은 시간 단위를 세분화하여 고장전류를 계산할 수 있도록 되어 있으



(a) Far-from-generator 조건



(b) Near-to-generator 조건

그림 2. IEC 60909의 고장전류 개념[12]

Fig. 2. Fault current concept of IEC 60909[12]

므로 본 논문에서는 IEC 규격을 사용하였다. IEC 60909 규격에서의 고장전류의 개념은 그림 2와 같이 2가지 조건에 따라 나뉘볼 수 있다. 하나는 그림 2(a)의 far-from-generator 조건이며 다른 하나는 그림 2(b)와 같은 near-to-generator 조건이다. 두 조건의 차이는 대칭분 전류의 크기가 변화하는가의 여부이며 이것은 다시 말해서 발전기나 회전기의 기여분이 변화하고 있음을 의미한다. Far-from-generator 조건의 경우는 배전계통이라면 일반적으로 전력회사에서 공급하는 계통을 의미하며 near-to-generator 조건의 경우는 회전기의 고장기여에 의해 고장전류대칭성분이 변화하는 경우이므로 상대적으로 회전기의 영향을 많이 받을 수 있는 조건의 계통을 의미한다.

IEC 60909에서 정의하는 고장전류는 시간 대역의 차이와 그 성분의 차이에 의해 다음과 같이 구분할 수 있다.

1) 초기 대칭분 전류 실효치,  $I_k''$ : 고장발생 순간에 예상되는 단락전류의 교류 대칭분(symmetrical component)의 실효치를 의미하며 따라서 기존의 순간전압강하 크기 추정 방식에서 계산하는 고장전류 값과 같다.

$$I_k'' = (V_m) / (Z_m'') \quad (7)$$

여기서  $V_m$ 은 고장점에서의 고장 직전의 전압이며  $Z_m''$ 는 초기 고장회로의 고장점에서 바라본 테브낭 등가 임피던스이다.

2) 최대 단락전류,  $I_p$ : 예상되는 단락전류의 최대 순시치를 의미한다.

$$I_p = k\sqrt{2}I_k'' \quad \text{단, } k = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} \quad (8)$$

$I_p$ 를 계산하는 방법은 부가적으로 A, B 및 C 방식으로 나뉜다. 방법 A는 고장점의 고장전류 기여 지로(path) 중 80%에 해당하는 것 까지 중 가장 작은  $R/X$ 를 사용하는 것이며 방법 B는 총 등가 임피던스의  $R/X$ 를 쓰되 여유율 1.15를 곱해서 쓰는 것이다. 또한 방법 C는 등가 주파수를 이용하여 계산하는 방식이다. 일반적으로 방법 B의 경우가 가장 큰 고장전류를 나타내므로 본 논문에서는 이 방식을 사용하였다.

3) 대칭 단락 차단전류,  $I_{bsym}$ : 차단기나 퓨즈 등이 동작하는 순간의 단락전류 실효치를 의미하며 시간이 지남에 따라 발생하는 단락 전류의 교류 대칭분 실효치를 의미한다.  $I_{bsym}$ 은 단락전류의 지로 종류에 따라 다음과 같이 표현된다.

-무한모선의 경우

$$I_{bsym} = I_k'' \quad (9)$$

-동기기(synchronous machine)의 경우

$$I_{bsym} = \mu I_k'' \quad (10)$$

여기서  $\mu$ 는 전류의 감쇄계수이며 식 (11)까지와 같이 정의된다. 여기서  $I_{kG}''$ 와  $I_{rG}$ 는 각각 발전기의 단락기여분과 정격 전류를 의미한다.

$$\begin{aligned} \mu &= 0.84 + 0.26e^{-0.26I_{kG}''/I_{rG}} (t_{min} = 0.02sec) \\ \mu &= 0.71 + 0.51e^{-0.30I_{kG}''/I_{rG}} (t_{min} = 0.05sec) \\ \mu &= 0.62 + 0.72e^{-0.32I_{kG}''/I_{rG}} (t_{min} = 0.10sec) \\ \mu &= 0.56 + 0.94e^{-0.38I_{kG}''/I_{rG}} (t_{min} \geq 0.25sec) \end{aligned} \quad (11)$$

-비동기기(asynchronous machine)의 경우

$$I_{bsym} = \mu q I_k'' \quad (12)$$

여기서  $q$ 는  $\mu$ 와 같이 전류의 감쇄계수이며 비동기기에만 고려되는 계수로 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} q &= 1.03 + 0.12\ln(P_{rM}/p) (t_{min} = 0.02sec) \\ q &= 0.79 + 0.12\ln(P_{rM}/p) (t_{min} = 0.05sec) \\ q &= 0.57 + 0.12\ln(P_{rM}/p) (t_{min} = 0.10sec) \\ q &= 0.26 + 0.12\ln(P_{rM}/p) (t_{min} \geq 0.25sec) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $P_{rM}$ 과  $p$ 는 각각 MW 단위의 유효전력과 극수의 쌍수(pair of poles)를 의미한다. 이 밖에도 단락전류의 직류성분인  $I_{dc}$ , 비대칭 단락 차단전류  $I_{bsym}$  및 정상상태 단락전류  $I_k$  등의 고장전류 성분이 존재한다.

이상으로 알 수 있는 것은 IEC 60909 고장해석의 기본은

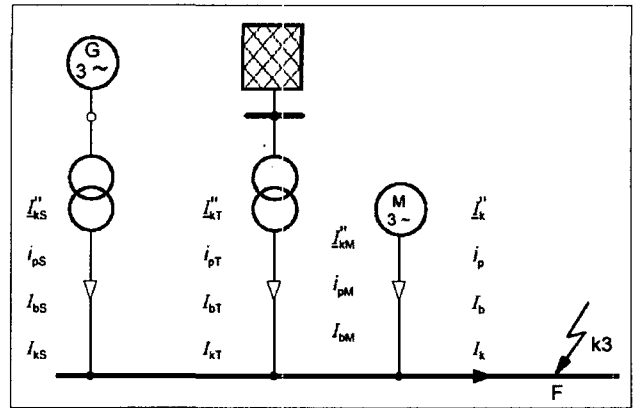


그림 3. IEC 고장해석의 개념[12]

Fig. 3. Concept of IEC short circuit analysis[12]

$I_k''$ 이라는 점이다.  $I_k''$ 은 초기 대칭분 실효치 이므로 시간에 따른 변화를 고려하지 않으며 외부로부터의 별다른 고장 기여가 존재하지 않는다면 이 값은 변화하지 않아야만 한다. 물론 이것은 직류분에 의한 상호효과를 제외하고 본 것이다. 시간이 지남에 따라 변화하는 대칭분 고장전류 실효치인  $I_{bsym}$ 의 경우는  $I_k''$ 에 설비의 종류에 따라 특정한 계수인  $\mu$  및  $q$ 계수를 이용하여 계산한다. 결론적으로 IEC 고장해석은 각 지로마다의 고장전류들을 계산하고 고장점에서 각 지로에 의한 기여분을 합산하는 방식으로 구성되며 그림 3과 같이 표현된다.

그러나 실제로 많은 연결을 가지고 네트워크 형태로 구축된 계통에 대해 각 지로의 고장전류 기여분을 계산한다는 것은 매우 어려운 것이다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 고장전류 계산의 개념을 바꾸어 보았다.

- 식 (10)과 식 (12)의 동기기 및 비동기기의 단락전류 기여분은 초기 고장전류 대칭분  $I_k''$ 과 각 시간에 따른  $\mu$ 와  $q$ 계수를 계산하면 구할 수 있다. 회전기의 고장 기여분이 시간에 따라 변하는 것은 전압은 고정되어 있으므로 임피던스가 변한다는 의미로 해석할 수 있다. 전류의 표현식 대신 임피던스의 표현식으로 변환하면 임피던스를  $\mu$ (내지  $\mu q$ ) 계수로 나뉜 것으로 표현할 수 있다. 따라서 동기기 및 비동기기의 고장기여의 변화를 임피던스 변화로 표현하면 식 (14) 및 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$Z_{Syn-t} = (1/\mu_t) Z_{Syn}'' \quad (14)$$

$$Z_{Asyn-t} = (1/(\mu_t \times q_t)) Z_{Asyn}'' \quad (15)$$

여기서  $Z_{Syn}''$ 와  $Z_{Asyn}''$ 은 각각 동기기 및 비동기기의 차과도 임피던스이며  $Z_{Syn-t}$  및  $Z_{Asyn-t}$ 은 시간  $t$ 에서의 동기기 및 비동기기의 임피던스이다. 따라서 계통상의 나머지 임피던스 성분들은 시 불변이며 회전기의 경우 식 (14) 및 식 (15)와 같이 시변성으로 표현된다면 계통은 시변성의 임피던스 네트워크로 표현될 수 있다.

### 3.3 시변성의 순간전압강하 크기 추정 방법

앞서 시변성의 임피던스 네트워크로 계통을 표현하는 방법으로 정리하였으므로 시변성의 순간전압강하의 크기는 다음의 단계에 의해 추정될 수 있다.

**단계 1)** 각 계통 콤포넌트의 임피던스 및 종류(선로, 무한모선, 발전기, 전동기, 변압기) 파악하여 시변성의 임피던스 맵(map)을 식 (16)과 같이 구성할 수 있다. 임피던스 행렬은 각 시간별 임피던스라는 의미로 첨자  $t$ 가 붙여졌다.

$$Z_{k-t}^i = \begin{pmatrix} Z_{11-t}^i & Z_{12-t}^i & \dots & Z_{1k-t}^i & \dots & Z_{1N-t}^i \\ Z_{21-t}^i & Z_{22-t}^i & \dots & Z_{2k-t}^i & \dots & Z_{2N-t}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1-t}^i & Z_{k2-t}^i & \dots & Z_{kk-t}^i & \dots & Z_{kN-t}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1-t}^i & Z_{N2-t}^i & \dots & Z_{Nk-t}^i & \dots & Z_{NN-t}^i \end{pmatrix} \quad (16)$$

여기서  $i=(1, 2, 0)$ 는 대칭분 성분을 나타내며 1은 정상분, 2는 역상분, 0은 영상분을 나타낸다.

**단계 2)** 고장점  $k$ 에서의 고장시 시간  $t$ 에서의 고장전류의 대칭 성분(symmetrical components)은 식 (17)에서 식 (20)과 같이 계산할 수 있다.

① 3상 단락의 경우

$$I_{kf-t}^1 = \frac{V_{kf}}{Z_{kk-t}^1 + Z_f}, \quad (I_{kf-t}^2 = 0, I_{kf-t}^0 = 0) \quad (17)$$

여기서  $Z_f$ 는 고장점 임피던스이다.

② 1선 지락의 경우

$$I_{kf-t}^1 = I_{kf-t}^2 = I_{kf-t}^0 = \frac{V_{kf}}{Z_{kk-t}^1 + Z_{kk-t}^2 + Z_{kk-t}^0 + 3Z_f} \quad (18)$$

③ 선간 단락의 경우

$$I_{kf-t}^1 = -I_{kf-t}^2 = \frac{V_{kf}}{Z_{kk-t}^1 + Z_{kk-t}^2 + 3Z_f}, \quad (I_{kf-t}^0 = 0) \quad (19)$$

④ 2선 지락의 경우

$$I_{kf-t}^1 = \frac{V_{kf}}{Z_{kk-t}^1 + \left( \frac{Z_{kk-t}^2 (Z_{kk-t}^0 + 3Z_f)}{Z_{kk-t}^2 + Z_{kk-t}^0 + 3Z_f} \right)} \quad (20)$$

$$I_{kf-t}^2 = -I_{kf-t}^1 \left( \frac{Z_{kk-t}^0 (Z_{kk-t}^1 + 3Z_f)}{Z_{kk-t}^2 + Z_{kk-t}^0 + 3Z_f} \right)$$

$$I_{kf-t}^0 = -I_{kf-t}^1 \left( \frac{Z_{kk-t}^2}{Z_{kk-t}^2 + Z_{kk-t}^0 + 3Z_f} \right)$$

**단계 3)** 고장 시 임의의 모선  $j$ 에서의 전압

임의의 모선  $j$ 에서의 시간  $t$ 에서의 대칭성분 전압은 식 (21)과 같이 표현된다.

$$V_{jf-t}^0 = -Z_{jk-t}^0 I_{kf-t}^0$$

$$V_{jf-t}^1 = V_{kf} - Z_{jk-t}^1 I_{kf-t}^1$$

$$V_{jf-t}^2 = -Z_{jk-t}^2 I_{kf-t}^2 \quad (21)$$

따라서 임의의 모선  $j$ 에서의 각 상의 최종전압은 대칭성분 전압은 식 (22)와 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} V_{jf-t}^A \\ V_{jf-t}^B \\ V_{jf-t}^C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{jf-t}^0 \\ V_{jf-t}^1 \\ V_{jf-t}^2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

여기서  $A, B,$  및  $C$ 는 각 상을 의미하며  $a$ 는  $1 \angle 120^\circ$ 를  $a^2$ 은  $1 \angle 240^\circ$ 의 벡터를 나타낸다.

**단계 4)** 시간  $t$ 에서의 순간전압강하 크기  $M_{VS-t}\%$ 를 계산

임의의 모선  $j$ 에서의 각 상의 순간전압강하 크기는 식 (23)과 같이 표현된다.

$$M_{VS-t}^A = (1 - V_{jf-t}^A) \times 100\%$$

$$M_{VS-t}^B = (1 - V_{jf-t}^B) \times 100\%$$

$$M_{VS-t}^C = (1 - V_{jf-t}^C) \times 100\% \quad (23)$$

**단계 5)** 모든 고장점에 대해 계산한 후 종료한다.

## 4. 사례 연구

사례연구에 이용된 계통은 그림 4와 같은 일반적인 수용가 계통이다. 예제 계통은 총 22개의 모선으로 구성되어 있으며 대용량 전동기가 주요 부하인 산업용 수용가의 경우를 모의하기 위해 1기 무한모선, 6기의 전동기 및 5개의 변압기로 구성하였다. 실 계통에 근접하게 구성하기 위해 전압은 22.9kV, 6.6kV, 0.44kV 및 0.38kV의 네 가지로 구성하였으며 전동기의 용량 및 기동시 특성을 고려하여 선로의 굵기 및 변압기 용량이 결정되었다. 고장 계산을 위한 기준 용량은 100MVA이며 예제 계통의 주파수는 60Hz 계통이다. 예제 계통의 각 콤포넌트의 구성은 표 1에 나타내었다. 변압기, 발전기 및 전동기의 계통 전압과 기기 명판 전압(nameplate voltage)은 동일한 것으로 가정하였다.

표 1의 케이블의 경우는 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 CV형을 이용하였으며 임피던스 데이터는 참고문헌 [13]과 제조사 및 엔지니어링 회사의 자료를 활용하였다. 변압기의 경우는 수용가에서 주로 사용하는 몰드형(mold type)을 사용하였으며 임피던스 데이터의 경우 참고문헌 [14]의 자료를 이용하였다. 전동기의 경우 모두 유도형(induction type)으로 구성하였으며 용량에 따라 과도한 전선 용량의 부담을 피하기 위해 저압쪽(0.44kV)과 고압쪽(6.6kV)으로 나누어 구성하였다.

그림 5에는 모선 4번의 3상 단락 고장 시 16 및 19번 모선의 부하의 전압 크기를 도시하였다. 예제 계통의 고장 기여를 일으키는 부하인 전동기의 경우 모두  $\Delta$ (delta)로 수전 받는 비접지 계통이므로 지락의 영향은 거의 없는 것으로 나타났고 따라서 3상 단락에 대해서만 모의하였다. 각 사고는 0 $\Omega$ , 0.5 $\Omega$ , 1.0 $\Omega$  및 2.0 $\Omega$ 의 고장저항(fault resistance)을 투입하여 계산된 것으로 그림 5에는 초기(1/2 주기), 2주기, 3주기, 6주기, 15주기의 순간전압강하 크기를 연결하여 그 변화 추이를 볼 수 있도록 하였다. 이것은 앞서 설명한  $\mu$  및  $q$ 계수의 시간 정의 대역인 0.02초, 0.05초, 0.10초 및 0.25

표 1. 예제계통의 각 컴포넌트들의 입력 데이터

Table 1. Input data of each component for the example system

From	To	종류	전압(kV)	특성 데이터								
				단락용량(MVA)			X/R					
무한모선				3상단락	선간단락	1선지락	정상	역상	영상			
01	-	-	22.9	200	150	200	5.0	5.0	5.0			
선로				길이(m)	임피던스(Ω.(p.u)/km)							
					R1	X1	R0	X0				
01	02	CNCV 325mm <sup>2</sup>	22.9	10	0.01432	0.02374	0.04466	0.01561				
03	04	CV 22mm <sup>2</sup>	6.6	10	2.43342	0.41322	4.86685	0.82644				
04	05	CV 14mm <sup>2</sup>	6.6	15	3.83379	0.44077	7.66758	0.88154				
06	07	CV 30mm <sup>2</sup>	0.38	120	0.00054	0.00009	0.00108	0.00019				
04	08	CV 14mm <sup>2</sup>	6.6	10	3.83379	0.44077	7.66758	0.88154				
09	10	CV 30mm <sup>2</sup>	0.38	80	0.00054	0.00009	0.00108	0.00019				
03	11	CV 22mm <sup>2</sup>	6.6	80	2.43342	0.41322	4.86685	0.82644				
03	12	CV 22mm <sup>2</sup>	6.6	15	2.43342	0.41322	4.86685	0.82644				
13	14	CV 200mm <sup>2</sup>	0.44	120	0.00003	0.00003	0.00006	0.00006				
13	15	CV 200mm <sup>2</sup>	0.44	120	0.00003	0.00003	0.00006	0.00006				
13	16	CV 125mm <sup>2</sup>	0.44	110	0.00005	0.00003	0.00010	0.00006				
13	17	CV 125mm <sup>2</sup>	0.44	130	0.00005	0.00003	0.00010	0.00006				
03	18	CV 22mm <sup>2</sup>	6.6	15	2.43342	0.41322	4.86685	0.82644				
18	19	CV 14mm <sup>2</sup>	6.6	120	3.83379	0.44077	7.66758	0.88154				
18	20	CV 14mm <sup>2</sup>	6.6	10	3.83379	0.44077	7.66758	0.88154				
21	22	CV 30mm <sup>2</sup>	0.38	150	0.00054	0.00009	0.00108	0.00019				
변압기				용량(kVA)	결선방식	%임피던스(self base)						
						R1	X1	R0	X0			
02	03	Mold type	22.9/6.6	4000	Δ-Δ	0.59917	6.97430	0.59917	6.97430			
05	06	Mold type	6.6/0.38	100	Δ-Y접지	1.75369	3.59510	1.75369	3.59510			
08	09	Mold type	6.6/0.38	100	Δ-Y접지	1.75369	3.59510	1.75369	3.59510			
12	13	Mold type	6.6/0.44	2000	Δ-Δ	0.60785	5.96910	0.60785	5.96910			
20	21	Mold type	6.6/0.38	100	Δ-Y접지	1.75369	3.59510	1.75369	3.59510			
전동기				용량(kVA)	접지	역률	효율	극수	%임피던스(self base)			
									%X''1	%X''0	X''/R1	X''/R0
11	-	Induction type	6.6	800	비 접지	0.923	0.906	4	17	17	9	9
14	-	Induction type	0.44	400	비 접지	0.923	0.906	4	17	17	9	9
15	-	Induction type	0.44	400	비 접지	0.923	0.906	4	17	17	9	9
16	-	Induction type	0.44	300	비 접지	0.910	0.896	4	17	17	9	9
17	-	Induction type	0.44	300	비 접지	0.910	0.896	4	17	17	9	9
19	-	Induction type	6.6	500	비 접지	0.910	0.879	6	17	17	9	9

초에 따라 나누어 본 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 고장 초기의 시간대역에서 급격한 전압 변동을 볼 수 있으며 시간이 지남에 따라 비교적 그 변동 폭은 작아짐을 볼 수 있으며 시간의 경과에 따라 전압의 크기가 상당히 감소함을 볼 수 있다. 또한 고장 저항이 적을수록 변화가 커지며 고장 저항이 점점 커짐에 따라 그 변화폭이 상당히 줄어들고 있음을 볼 수 있으며 이것은 그만큼 고장전류의 변화가 급격하기 때문이다.

표 2에는 각 모선들에서 3상 단락 고장 시 모선 16 및 19의 부하에 나타나는 순간전압강하의 크기를 기존 방식에 의한 추정 값과 본 논문에서 제시한 시변성의 순간전압강하 크기 추정 결과를 비교하였다. 각 시간대별로 기존방식의 예측 값에 비해 시변성의 순간전압강하 예측 결과가 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 이것은 모선 16의 경우가 상대적으로 모선 19에 비해 크며 다시 말하면 모선 16의 부하가

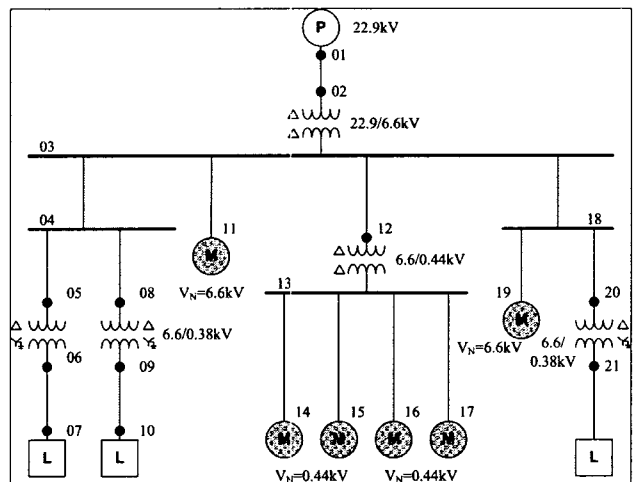
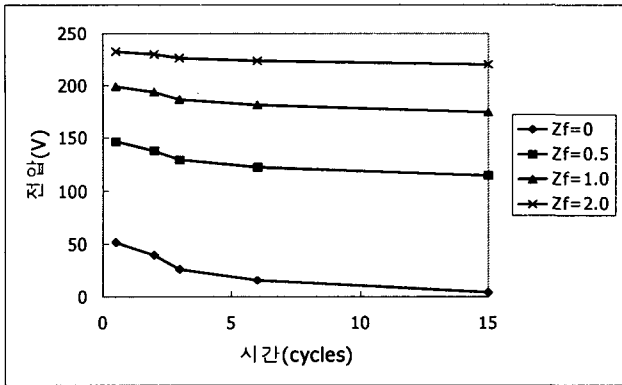
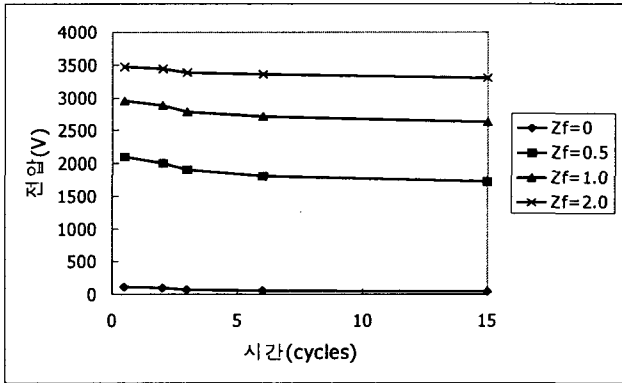


그림 4. 사례연구에 사용된 예제 계통  
Fig. 4. Example system used in case studies



(a) 모선 16



(b) 모선 19

그림 5. 모선 4번의 3상 단락 고장시 모선 16 및 19의 전압 변화

Fig. 5. Voltage profiles of node 16 and 19 during the three phase fault of node 4

모선 19의 부하에 비해 시변성의 순간전압강하에 영향을 더 받을 수 있다는 의미이다.

표에서 보는 편차는 기존방식에 의해 추정된 순간전압강하 크기(%)와 본 논문에서 제안한 방식에 의한 15주기의 순간전압강하 크기(%)의 차이를 의미한다. 표에서 보는 바와 같이 모선 16의 경우가 상대적으로 편차가 크음을 알 수 있으며 고장점 저항이 작을수록 그 편차가 상대적으로 크음을 알 수 있다. 이러한 편차는 적게는 1%에서 많게는 19%까지의 변화를 보임을 볼 수 있으며 실제 부하에 미치는 영향 또한 상당히 차이가 날 수 있음을 알 수 있다. 15주기가 아니라도 3주기의 편차만 보더라도 많게는 10% 정도의 차이를 보이고 있으며 따라서 계통 구성에 따라 시변성의 순간전압강하 영향을 고려해야 좀더 정밀한 순간전압강하 영향 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 회전기의 단락기여에 의한 시변성의 순간전압강하 특성 평가 방법을 제안하였다. 순간전압강하의 시변적 특성을 추정하기 위해 단락회로 해석 방식을 사용하였으며 본 논문에서는 IEC 규격에 기초한 시변성의 순간전압강하 추정 방식을 제시하였다. 간단한 산업용 수용가의 시

표 2. 모선들의 3상단락 고장에 따른 순간전압강하 크기의 변화

Table 2. Variation of voltage sag magnitude due to a three phase faults of nodes

모선	고장 모선	고장 저항 (Ω)	기존 방식	제안한 방식에 의한 결과					정상 상태	편차 %
				초기	2 주기	3 주기	6 주기	15 주기		
16	04	0	80	80	85	90	94	98	99	18
		0.5	42	42	46	49	52	55	56	13
		1.0	21	21	24	26	29	31	32	10
		2.0	8	8	9	11	12	13	14	5
	11	0	76	76	80	85	88	91	91	15
		0.5	38	38	41	45	48	51	52	12
		1.0	20	20	22	24	27	29	30	9
		2.0	8	8	9	10	11	13	13	5
	12	0	80	80	85	90	94	99	100	19
		0.5	43	43	47	50	53	56	57	13
		1.0	22	22	24	27	29	32	33	10
		2.0	9	9	10	11	13	14	14	5
18	0	80	80	84	89	94	98	98	18	
	0.5	42	42	45	49	52	55	55	13	
	1.0	21	21	23	26	28	31	32	10	
	2.0	8	8	9	11	12	13	14	5	
20	0	79	79	84	89	93	96	97	17	
	0.5	41	41	44	48	51	54	54	13	
	1.0	21	21	23	26	28	30	31	10	
	2.0	8	8	9	11	12	13	14	5	
순간전압강하 크기 변화 편차%의 평균값									11.2	
19	04	0	97	97	98	98	98	99	99	2
		0.5	45	45	47	50	52	55	56	10
		1.0	23	23	25	27	29	31	32	9
		2.0	9	9	10	11	12	13	14	4
	11	0	88	88	89	90	91	91	91	3
		0.5	41	41	43	46	48	51	52	10
		1.0	21	21	23	25	27	29	30	8
		2.0	8	8	9	11	12	13	13	4
	12	0	97	97	97	98	98	98	98	2
		0.5	45	45	47	50	52	55	55	10
		1.0	22	22	24	27	29	31	32	9
		2.0	9	9	10	11	12	13	14	4
18	0	99	99	99	99	100	100	100	1	
	0.5	46	46	49	51	54	56	57	10	
	1.0	24	24	26	28	30	32	33	8	
	2.0	10	10	11	12	13	14	14	4	
20	0	96	96	97	97	98	98	98	2	
	0.5	45	45	48	50	53	55	56	10	
	1.0	23	23	25	27	29	32	32	8	
	2.0	10	10	10	12	13	14	14	4	
순간전압강하 크기 변화 편차%의 평균값									6.1	

험 계통에 대한 사례연구를 통해 고장 초기에 비해 시간이 지남에 따라 상당히 큰 순간전압강하 크기 변화가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 기존 방식과 같이 고정값을 사용한 순간전압강하 크기를 이용하여 부하의 영향 평가나 계통의 전력품질 평가를 할 경우 실제 발생하는 시변성의 순간전압강하 크기를 이용하여 수행한 경우에 비해 상당한 오차를 일으킬 수 있음을 알 수 있었다. 제시한 방식은 파형 감

시와 같이 완전한 순간전압강하 파형을 제시하지는 못하지만 그와 유사하게 고장해석을 통해 시변성의 순간전압강하 실효치를 유추함으로써 향후 이 분야 연구의 기초 자료로 활용할 수 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] T.S. Key, "Diagnosing power-quality related computer problems," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 15, no. 4, pp. 381-393, Jul. 1979.
- [2] L. E. Conrad and Math H. J. Bollen, "Voltage sag coordination for reliable plant operation," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 33, no. 6, pp. 1459-1464, Nov./Dec. 1997.
- [3] D. L. Brooks, et al., "Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance," IEEE Trans. on PWRD, vol. 13, no. 1, pp. 254-259, Jan. 1998.
- [4] C. J. Melhorn, T. D. Davis, and G. E. Beam, "Voltage sags: their impact on the utility and industrial customers," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 34, no. 3, pp. 549-558, May/Jun. 1998.
- [5] C. Becker et al., "Proposed chapter9 for predicting voltage sags (dip) in revision to IEEE Std 493, the Gold Book," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 30, no. 3, pp. 805-821, May/Jun. 1994.
- [6] L. Zhang and Math H. J. Bollen, "Characteristic of voltage dips(sags) in power systems," IEEE Trans. on PWRD, vol. 15, no. 2, pp. 827-832, Apr. 2000.
- [7] P. Heine, P. Pohjanheimo, and E. Lakervi, "A method for estimating the frequency and cost of voltage sags," IEEE Trans. on PWRS, vol. 17, no. 2, pp. 290-296, May 2002.
- [8] P. Heine and M. Lehtonen, "Voltage sag distributions caused by power system faults," IEEE Trans. on PWRS, vol. 18, no. 4, pp. 1367-1373, Nov. 2003.
- [9] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, IEEE Std. 1159, 1995.
- [10] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Jr., Power system analysis, McGraw-Hill, 1994.
- [11] IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants, ANSI/IEEE Std. 141., 1986.
- [12] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems- Part 0: calculation of currents, IEC 60909-0, 2001.
- [13] 의제 편집위원회, 신 전기설비 기술계산 핸드북(제 2 판), 도서출판 의제, 1999년.
- [14] LS산전(주) 홈페이지, <http://www.lsis.biz>

저 자 소 개



윤 상 윤 (尹 尙 潤)

1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원. 주 관심 분야는 전력품질 및 신뢰도 해석, 고장해석, 저압 차단기 분야임.

Tel : 043-261-6506  
Fax : 043-261-6629  
E-mail : syyun@lsis.biz