

The Method of Calculating the Distribution Loss Factor using the Load Current Pattern

최성훈[†] · 김준일* · 박용업**
(Seung-Hoon Choi · Joon-Eel Kim · Yong-Up Park)

Abstract - In order to establish the electric distribution system economically and operate efficiently, it becomes important to calculate energy losses of the system more accurately. This importance is not only related for the engineering of utilities' power network but also for the consumers' electric system. The Distribution Loss Factor (DLF) is the fundamental element of calculating the energy losses occurred through the electric system including the electric lines and equipments. Up to now, the DLF is calculated by empirical formulas using the correlation between the DLF itself and Load Factor. However, these methods have some limitations to reflect the various characteristics of the system and the load. In this regard, the novel method proposed here is developed to yield more accurate result of DLF which actively interacting with the characteristics and load patterns of the system. The improvement of accuracy is very significant according to the results of verification presented at the end of this paper.

Key Words : Distribution Loss Factor, energy losses

1. 서론

전력회사의 전력망과 고객구내의 수전계통 등에서 발생하는 손실은 전력선에서 발생하는 선로손실과 변압기, 조상기 등 전력설비에서 발생하는 기기손실로 나눌 수 있다. 이와 같은 전력손실은 전력선 또는 기기의 저항과 전류의 제곱으로 계산되고 따라서, 부하설비에 의해 발생하는 부하전류와 직접적으로 관련이 있다. 그러나 부하설비에서 발생하는 부하전류의 크기는 매 순간 실시간으로 그 크기가 변동하여 이를 이용한 전력손실을 계산하는 것은 상당히 어려운 일이다.

실제 전력계통의 손실계산은 부하전류의 순시값을 대표하는 값으로서 계산 기간 동안에 나타난 최대부하 전류값을 적용하고 있으며, 이 값을 실제 손실량으로 만들어 주는 것이 손실계수이므로 손실계산에서 정확한 손실계수의 적용은 무엇보다도 중요한 문제가 된다.

2. 손실계수의 이해

2.1 손실계수(H)

아래 그림과 같은 전력계통의 선로에서 발생하는 손실을 구할 때, 선로에 흐르는 전류를 I, 선로의 임피던스를 Z라고

가정하면 일정기간(T) 동안 발생한 손실량 W_c 는 이어지는 식과 같다.



$$W_c = \int_0^T Z I^2 dt \quad (1)$$

위 식에서 임피던스 Z와 기간 T는 정해져 있으나, 부하전류 I는 실시간으로 변하는 값이므로 손실량 계산에 직접 적용하기 곤란하다.

우선, 위 식에서 부하전류 I를 해당기간의 최대부하전류 I_m 으로 바꾸어 이 값을 W_{cv} 라고 하면 아래와 같다.

$$W_{cv} = \int_0^T Z I_m^2 dt = Z \cdot I_m^2 \cdot T \quad (2)$$

이와 같은 변형으로부터, W_{cv} 와 실제 알고자 하는 손실량 W_c 사이에서 두 값의 차이를 보정하는 즉, $W_c = H \cdot W_{cv}$ 를 만족하는 가상의 계수 H를 도입할 수 있는데 이 값이 손실계수이다.

이상의 손실계수를 도입하면 손실량 W_c 는 아래의 공식으로 쉽게 표현이 가능하다.

$$W_c = H \cdot W_{cv} = H \cdot Z \cdot I_m^2 \cdot T \quad (3)$$

[†] 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
E-mail : dukuby@kepeco.co.kr

* 정 회원 : 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

** 정 회원 : 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

접수일자 : 2009년 7월 22일

최종완료 : 2009년 9월 26일

2.2 부하율(F)와 손실계수(H)

앞에서 살펴본 손실계수는 W_{cr} 와 W_{cv} 의 관계에 의해 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$H = \frac{W_{cr}}{W_{cv}} = \frac{1}{I_m^2 \cdot T} \cdot \int_0^T I^2 dt = \frac{\int_0^T I^2 dt}{I_m^2 \cdot T} \quad (4)$$

즉, 손실계수 H는 다음의 의미와 같다.

$$H = \frac{T \text{기간동안의 부하전류 공급의 평균}}{T \text{기간 최대부하전류의 제곱}} \quad (5)$$

한편, 부하율 F는 특정기간의 평균전력을 동기간 최대전력으로 나누어 산출하며, 수식은 다음과 같다.

$$F = \frac{T \text{기간동안의 부하전류의 평균}}{T \text{기간 최대부하전류}} = \frac{\int_0^T I dt}{I_m \cdot T} \quad (6)$$

위의 부하율 F는 손실계수 H와 일정한 상관관계가 있으며, 아래 식은 이와 같은 상관관계를 표현하고 있다[1].

$$1 \geq F \geq H \geq F^2 \geq 0 \quad (7)$$

국내에서는 위의 상관관계에서 파생된 아래의 대표적인 실험식으로 그동안 전력계통의 손실계수를 계산하고 손실량을 산출하였다[1].

$$\text{손실계수 } H = a \cdot F + (1-a) \cdot F^2 \quad (1 \geq a \geq 0) \quad (8)$$

위 식에서 a는 계통의 부하특성계수로 한전에서는 지금까지 0.32를 적용하여 왔으며, 최근 연구를 통해 값 0.12가 수정 제시되기도 하였다[2].

이 외에 손실계수 H를 구하는 실험식으로 아래와 같은 식들이 대표적이다[1].

- $H = \frac{F + F^2}{2}$
- $H = 0.083F - 1.066F^2 - 0.12F^3$ (Wolf의 식)

3. 부하패턴을 이용한 손실계수의 산정

3.1 부하전류 패턴화

전력계통에 흐르는 부하전류는 계통의 특성에 따라 다양한 형태로 변하며, 동일 계통에서도 그 변화는 일정한 패턴을 나타내지 않는다.

아래 그림은 한전의 한 배전선로에서 약 1개월간 시범적으로 측정된 부하전류를 그래프로 도식화 해 본 것이다.

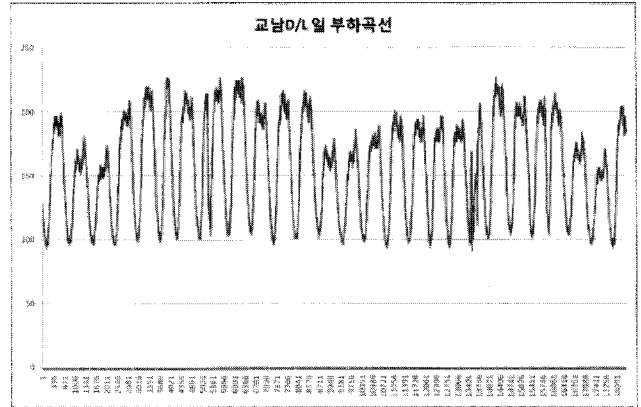


그림 1 교남 D/L 부하곡선

Fig. 1 Load Current of Kyo-Nam D/L

위의 그래프는 부하전류를 시간 영역으로 나타낸 것으로, 이것을 부하전류의 크기 순서로 재배열하면 아래와 같다.

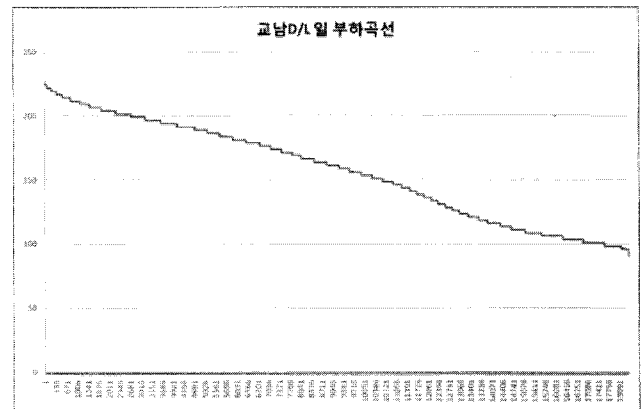


그림 2 부하전류 크기에 따른 재배열

Fig. 2 Load currents ordered by magnitude

위의 경우와 같이 시간영역에서 특정한 패턴이 없는 부하전류도 그림 3과 같이 크기 순으로 정렬하면 다음과 같이 세 종류의 패턴으로 대표화 할 수 있다.

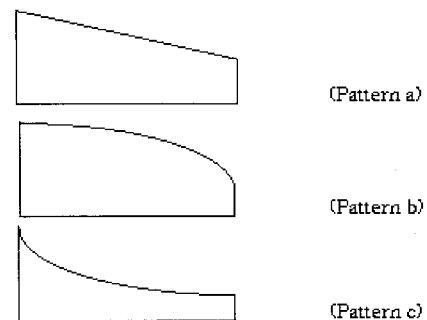


그림 3 부하전류 패턴

Fig. 3 The load current pattern

3.2 계통의 부하패턴 상대위치 결정

이상과 같이 부하전류의 패턴을 정하고, 분산손실계수의 계산에서 사용하는 아래 식으로 각 패턴에서의 참고값을 계산할 수 있다. 여기서, H_a, H_b, H_c 는 패턴 a, b, c의 손실계수 참고값을 나타낸다[1].

$$H_a = \frac{1}{3}(1 + \gamma + \gamma^2) \tag{9}$$

$$H_b = \frac{1}{3}(1.6 + 0.8\gamma + 0.6\gamma^2) \tag{10}$$

$$H_c = \frac{1}{3}(0.6 + 0.8\gamma + 1.6\gamma^2) \tag{11}$$

$$\gamma = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \quad (I_{\max} : \text{최대부하전류}, I_{\min} : \text{최소부하전류})$$

본 논문에서 제안하는 손실계수 계산 방법에서는 검토 대상 배전계통 및 기간의 최대, 최소, 평균 부하전력으로부터 최대, 최소, 평균 부하전류 및 최대, 최소 부하전류의 중간값을 구하고 이 중간값과 평균 부하전류의 상대위치를 통해 계통의 특성이 상기 패턴 a를 중심으로 패턴 b 또는 패턴 c의 방향으로 이격된 거리를 산정하여 손실계수 계산에 사용한다.

위의 이격거리 또는 상대위치를 P라고 할 때 P는 아래의 식으로 구한다.

$$P = \frac{I_{avr} - I_{mid}}{(I_{\max} - I_{\min}) \div 2} \tag{12}$$

여기서,

- I_{avr} : 평균부하전류
- I_{mid} : 최대, 최소전류의 중간값
- I_{\max} : 최대부하전류
- I_{\min} : 최소부하전류

3.3 패턴상대위치로 손실계수 계산

전력계통의 부하기록으로부터 계통의 패턴 상대위치를 결정하게 되면, 기준이 되는 패턴 a의 손실계수,

$$H_a = \frac{1}{3}(1 + \gamma + \gamma^2)$$

로부터 패턴 b 또는 패턴 c의 방향으로 가감되는 변량을 구하여 손실계수 계산에 사용한다.

위의 변량은 각 패턴에서의 참고값 H_a, H_b, H_c 의 아래 상관관계에서 다음의 가정을 통해 산출한다.

먼저 H_a, H_b, H_c 의 관계를 γ 의 값을 X축으로 하는 그래프로 나타내면 다음과 같다.

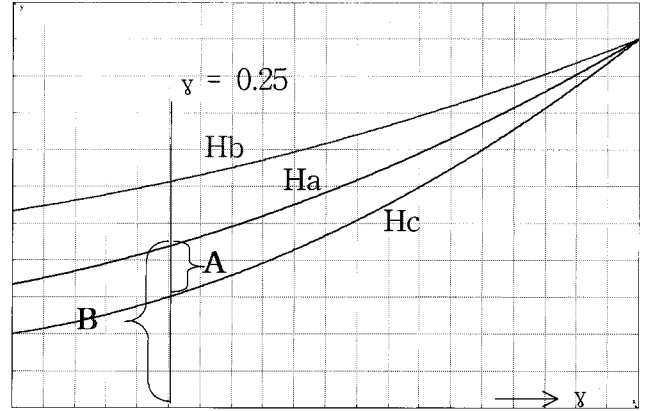


그림 4 H_a, H_b, H_c 상관관계
Fig. 4 Correlation of H_a, H_b, H_c

위의 그래프에서 $\gamma = 0.25$ 일 때, 앞에서 구한 상대위치 P가 $\frac{A}{B}$ 의 위치(즉, $\frac{H_a - H_c}{H_a}$)에 있을 때, 해당계통의 손실계수 H는 H_c 와 가까운 값을 가지는 것으로 가정한다.

여기에서, $\frac{H_a - H_c}{H_a}$ 를 특성계수 K라고 하고, 해당계통의 손실계수 H는 H_a 로부터 H_c 의 방향으로 $\frac{P}{K} \times (H_a - H_c)$ 만큼 떨어진 값 즉,

$$H = H_a + [\frac{P}{K} \times (H_a - H_c)] = H_a + P \times H_c \tag{13}$$

로 구할 수 있다.

한편 P가 양수가 되는 - 부하의 패턴에 패턴 a를 중심으로 패턴 b의 방향으로 치우친 - 경우의 K는,

$$K = \frac{H_b - H_a}{1 - H_a} \tag{14}$$

와 같이 구하게 되고, 손실계수 H를 구하는 식은 아래와 같다.

$$H = H_a + [\frac{P}{K} \times (H_b - H_a)] = H_a + P \times (1 - H_a) \tag{15}$$

이상의 식을 정리하면 다음과 같다.

가. 패턴 b에 가까울 때 : 평균부하전류가 중간값보다 클 때

$$H = H_a + P \times (1 - H_a) \tag{16}$$

나. 패턴 c에 가까울 때 : 평균부하전류가 중간값보다 작을 때

$$H = H_a + P \times H_c \tag{17}$$

지금까지 소개된 계산과정을 한전 배전계통 교남D/L에서 1개월간 측정된 자료를 기초로 예시하면 다음과 같다.

1) 측정자료

회선	I _{max}	I _{min}	I _{avr}
교남	226.9	90.8	156.7

2) 부하패턴 상대위치

• 부하전류중간값 = $\frac{I_{max} + I_{min}}{2} = 158.9[A]$

• 패턴상대위치 $P = \frac{I_{avr} - I_{mid}}{(I_{max} - I_{mid}) \div 2}$
 $= \frac{156.7 - 158.9}{(226.9 - 90.8) \div 2} = -3.14[\%]$

• $\gamma = \frac{I_{min}}{I_{max}} = 0.4$

• $H_a = \frac{1}{3}(1 + \gamma + \gamma^2) = \frac{1}{3}(1 + 0.4 + 0.4^2) = 0.52$

• $H_b = \frac{1}{3}(1.6 + 0.8\gamma + 0.6\gamma^2)$
 $= \frac{1}{3}(1.6 + 0.8 \cdot 0.4 + 0.6 \cdot 0.4^2) = 0.672$

• $H_c = \frac{1}{3}(0.6 + 0.8\gamma + 1.6\gamma^2)$
 $= \frac{1}{3}(0.6 + 0.8 \cdot 0.4 + 1.6 \cdot 0.4^2) = 0.392$

• $H = H_a + P \times H_a = 0.52 - 1.664 = 0.5037$

3) 손실계수 계산값 비교

이상의 계산결과를 기존의 실험식 $H = a \cdot F + (1-a) \cdot F^2$ ($a = 0.32$)의 결과와 비교해 보면 아래 표와 같다.

표 1 손실계수 계산값 비교

Table 1 Comparison of estimations

항 목	기존식	패턴식	실제값
계산결과	0.54527	0.50366	0.50498
오차	0.04029	0.00132	

위의 표에서 실제값이란 한전 교남 D/L에서 1개월 동안

측정 기록한 부하전류의 순시값으로 $\frac{\int_0^T I^2 dt}{I_m^2 \cdot T}$ 의 산식에서

직접 구한 값이다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 부하전류 패턴을 이용하여 산출된 손실계수가 기존의 실험식 값보다 더욱 정확한 결과를 나타내고 있다.

4. 계산식 검증

지금까지 소개된 부하패턴을 이용한 손실계수 계산 방법의 정확도를 검증하기 위해 앞의 예에서 사용한 교남 D/L을 포함하여 한전 배전계통의 14개 D/L에서 1개월간 순시전류를 측정하고, 기존의 실험식과 본 논문에서 제안한 수식으로 산출된 손실계수를 비교, 정리하면 다음의 표와 같다.

표 2 손실계수 산정방식별 결과값 비교

Table 2 Verification of estimations

회선명	실제값	기존식	패턴식
교남	0.504980	0.545267	0.503657
두산	0.505278	0.529595	0.542312
마른내	0.222170	0.199834	0.222092
서울역	0.422370	0.428139	0.405212
서충	0.300478	0.306836	0.309160
수송	0.311288	0.344737	0.323378
신라	0.569120	0.621028	0.597106
신문로	0.307505	0.331108	0.321051
신장	0.062366	0.091810	0.120373
아현	0.473263	0.520798	0.474895
운동	0.282203	0.244806	0.251167
원곡	0.269182	0.308540	0.296680
울곡	0.502512	0.545498	0.509383
현철	0.062599	0.096947	0.127590

다음의 표는 각 계산결과와의 오차를 비교한 것이다.

표 3 손실계수 계산결과 오차값 비교

Table 3 Comparison of Error

회선명	기존식	패턴식	개선값
교남	0.040287	0.001323	0.038963
두산	0.024317	0.037034	-0.012717
마른내	0.022337	0.000078	0.022258
서울역	0.005770	0.017158	-0.011388
서충	0.006359	0.008682	-0.002324
수송	0.033449	0.012090	0.021359
신라	0.051908	0.027987	0.023922
신문로	0.023603	0.013547	0.010057
신장	0.029444	0.058007	-0.028563
아현	0.047535	0.001632	0.045903
운동	0.037397	0.031036	0.006361
원곡	0.039358	0.027498	0.011860
울곡	0.042987	0.006871	0.036115

현철	0.034347	0.064991	-0.030644
최대오차	0.051908	0.064991	
최소오차	0.005770	0.000078	
평균오차	0.031364	0.021995	0.009369

표의 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 패턴식은 대부분의 경우에서 개선된 결과를 보여주고 있으며, 평균오차는 0.031364에서 0.021995으로 0.009369가 개선되어 약 30%의 개선율을 보이고 있다.

5. 정확도 향상을 위한 보정계수

표 2, 표 3의 결과를 살펴보면 대부분의 경우에서 패턴식은 상대적으로 정확한 손실계수를 산출하고 있지만, 신장 D/L과 현철 D/L 등에서의 오차는 기존의 결과보다 크게 증가하였다.

본 절에서는 이와 같이 오차가 크게 증가하는 선로의 특성을 분석하고 계산 결과의 정확도를 향상할 수 있는 보정계수의 사용을 검토하였다.

5.1 신장, 현철 D/L의 부하특성

아래의 표는 두 선로의 부하율과 γ 값을 전체 평균과 비교해 본 것이다.

표 4 부하율 및 γ & 전체 평균값 비교

Table 4 Comparison of load factor and γ

회선명	부하율(F)	γ
신장	0.201029	0.031746
현철	0.209601	0.029240
전체평균	0.515530	0.198720

앞의 표와 같이 신장 D/L과 현철 D/L의 두드러진 특징은 낮은 부하율과 $\gamma = \frac{I_{min}}{I_{max}}$ 값으로 대표된다.

한편, 측정된 신장 D/L의 부하전류 곡선을 패턴화하여 살펴보면 다음의 그림과 같다

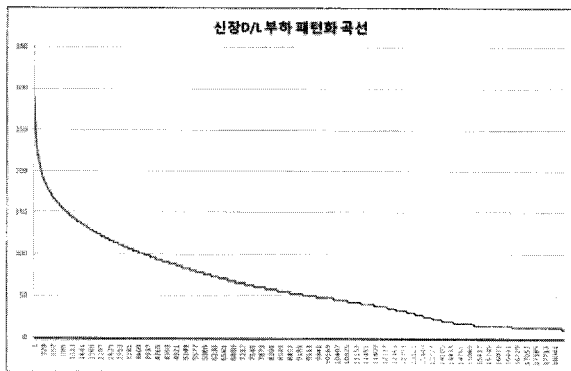


그림 5 신장 D/L 부하전류 패턴 곡선

Fig. 5 Load current patter

5.2 특성계수의 보정

신장, 현철 D/L과 같이 일반적인 경우에 비해 특히 낮은 부하율 F와 γ 의 값을 손실계수에 반영하기 위하여, 3.3절에서 소개한 특성계수 K를 아래와 같이 보정하였다.

$$K_c = K - \left(\frac{F}{\gamma} + 100\right) \tag{18}$$

5.3 보정된 특성계수 검증

이상의 과정에서 만들어진 손실계수 수식을 정리하면 아래와 같다.

• 패턴 b에 가까울 때 : 평균부하전류가 중간값보다 클 때

$$H = H_a + \left[\frac{P}{K_c} \times (H_b - H_a)\right] \tag{19}$$

$$\therefore K_c = \frac{H_b - H_a}{1 - H_a} - \left(\frac{F}{\gamma} + 100\right)$$

• 패턴 c에 가까울 때 : 평균부하전류가 중간값보다 작을 때

$$H = H_a + \left[\frac{P}{K_c} \times (H_a - H_c)\right] \tag{20}$$

$$\therefore K_c = \frac{H_a - H_c}{H_a} - \left(\frac{F}{\gamma} + 100\right)$$

위의 최종식으로 계산한 손실계수를 기존의 결과와 비교하면 다음 표와 같다.

표 5 손실계수 산정방식별 결과값 비교

Table 5 Verification of Estimations

회선명	실제값	기존식	패턴식
교남	0.504980	0.545267	0.502424
두산	0.505278	0.529595	0.519520
마른내	0.222170	0.199834	0.199203
서울역	0.422370	0.428139	0.404305
서충	0.300478	0.306836	0.300335
수송	0.311288	0.344737	0.315852
신라	0.569120	0.621028	0.593097
신문로	0.307505	0.331108	0.313797
신장	0.062366	0.091810	0.077354
아현	0.473263	0.520798	0.472180
운동	0.282203	0.244806	0.237504
원곡	0.269182	0.308540	0.287616
울곡	0.502512	0.545498	0.509307
현철	0.062599	0.096947	0.079526

다음의 표는 보정된 패턴식에서 나타난 오차를 기존 실험식의 결과와 비교한 것이다.

표 6 손실계수 산정방식별 오차 비교

Table 6 Comparison of Error

회선명	기존식	패턴식	개선값
교남	0.040287	0.002556	0.037731
두산	0.024317	0.014242	0.010075
마른내	0.022337	0.022967	-0.000631
서울역	0.005770	0.018065	-0.012295
서충	0.006359	0.000143	0.006216
수송	0.033449	0.004564	0.028885
신라	0.051908	0.023977	0.027931
신문로	0.023603	0.006292	0.017311
신장	0.029444	0.014989	0.014455
아현	0.047535	0.001083	0.046453
운동	0.037397	0.044699	-0.007302
원곡	0.039358	0.018434	0.020924
율곡	0.042987	0.006795	0.036191
현철	0.034347	0.016927	0.017421
최대값	0.051908	0.044699	
최소값	0.005770	0.000143	
평균오차	0.031364	0.013981	0.017383

이상의 결과와 같이 보정된 패턴식은 대부분의 경우에서 아주 정확한 손실계수를 산출하고 있으며, 그 오차는 0.031364에서 0.013981로 감소하여 약 55.4%의 개선율을 나타내고 있다.

6. 결 론

부하패턴을 이용한 손실계수 계산방법은 일반적으로 적용해 온 $H = a \cdot F + (1-a) \cdot F^2$ 의 실험식을 보완하기 위해 제안된 방식이다. 이 방법은 전력계통에서 실시간으로 변동하는 부하전류의 순시값들을 크기순으로 재배열하면 몇 가지 대표되는 패턴으로 분류될 수 있다는 발견에 근거하고 있다. 이와 같은 부하패턴의 판단을 위해 본 논문에서는 계통의 최대, 최소, 평균전력에서 최대, 최소, 평균 부하전류를 구하고, 평균전류와 최대, 최소전류 중간값의 크기로 패턴 상대위치를 판별하여 손실계수를 구하는 방법을 소개하였다. 또한 이에 대한 검증은 위하여 한전의 14개 배전선로에서 실측정한 값으로 기존 실험식의 계산결과와 그 정확도를 비교하였으며, 이를 통하여 평균오차가 0.031364에서 0.021995로 개선될 수 있음을 확인하였다.

이와 더불어 상기의 검증 과정에서 발견된 특이한 계통, 즉 낮은 부하율과 최대, 최소전력의 차이가 현저한 계통에서 나타나는 오차를 보정하기 위해 부하율과 최대, 최소 부하전류의 비로 결과를 보정하는 보정식을 사용하여 계산결과와

오차를 0.031364에서 0.013981로 더욱 현저하게 줄일 수 있음도 확인하였다. 이상의 결과에서 확인한 새로운 손실계수 계산방법은 더욱 정확한 계통의 손실계산을 가능하게 하여, 이를 통한 경제적이고 합리적인 계통구성, 평가 및 설계가 가능 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 한전 배전처 : “배전손실 관리지침”, 1985. 6.
- [2] 한전 배전처 : “배전 손실정수의 재 산정에 의한 손실 관리 최적 방안에 관한 연구”, 2003

저 자 소 개



최 성 훈 (崔 成 勳)

1968년 4월 7일생. 2007년 한국방송통신 대학 컴퓨터학과 졸업. 현재 한국전력 공사 전력연구원 송배전연구소 선임연구원
Tel : 042-865-5955
Fax : 042-865-5944
E-mail : dukuby@kepco.co.kr



김 준 일 (崔 成 勳)

1975년 8월 4일생. 2002년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2003년 University of Portsmouth 대학원 졸업(통신공학 석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.
Tel : 042-865-5953
Fax : 042-865-5944
E-mail : darkhorse@kepco.co.kr



박 용 업 (朴 用 業)

1976년 7월 19일생. 2003년 강원대학교 전기전자공학부 졸업. 2005년 동 대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소 일반연구원
Tel : 042-865-5956
Fax : 042-865-5944
E-mail : upup22@kepco.co.kr