

## 배전선로에서 전압측정치의 오차보정을 통한 정확한 구간부하 추정 방법

(Accurate Section Loading Estimation Method Based on  
Voltage Measurement Error Compensation in Distribution Systems)

박재형\* · 전철우 · 임성일\*\*

(Jaehyeong Park · CheolWoo Jeon · Seongil Lim)

### Abstract

Operational applications such as service restoration, voltage control and protection coordination are calculated based on the active and reactive power loading of the sections in the distribution networks. Loadings of the sections are estimated using the voltage and current measured from the automatic switches deployed along the primary feeders. But, due to the characteristics of the potential transformer attached to the switches, accuracy of the voltage magnitude is not acceptable to be used for section loading calculation. This paper proposes a new accurate section loading estimation method through voltage measurement error compensation by calculating voltage drop of the distribution line. In order to establish feasibility of the proposed method, various case studies based on Matlab simulation have been performed.

Key Words : Distribution Automation, Section Loading Calculation, State Estimation, Voltage Drop

### 1. 서 론

정전복구, 전압제어, 보호협조 등 배전계통운영에 사용되는 어플리케이션들은 구간부하 데이터를 기반으로 수행된다. 따라서 배전운영에서 정확한 구간부

하의 산정은 매우 중요하다. 예를 들어 배전선로에 고장이 발생하였을 때 실행되는 정전복구 어플리케이션은 정전구역과 연계선로의 구간부하를 기준으로 복구방안을 도출한다. 그런데 구간부하 데이터에 오차가 크다면 복구방안도 부정확할 수밖에 없으므로 부하절체의 결과가 연계선로 과부하의 원인이 되는 등 배전계통 공급신뢰도가 심각하게 저하된다. 만약 구간부하가 정확하다면 적절한 공급여유용량을 유지하면서 설비투자를 지연할 수 있으므로 배전선로의 공급신뢰도와 설비이용률 향상을 동시에 달성할 수 있다.

\* Main author : Dept. of Electrical Engineering,  
Kyungnam University, Master Course  
\*\* Corresponding author : Dept. of Electrical Eng.,  
Kyungnam University, Professor  
Tel : 055-249-2630, Fax : 0505-999-2161  
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr  
Received : 2015. 10. 28.  
Accepted : 2015. 12. 21.

배전시스템의 구간별 부하는 선로에 설치된 자동화개폐기에서 취득된 전압, 전류 및 위상으로부터 산정된다. 그런데 전압을 계측하기 위하여 자동화개폐기에 부착된 계기용변성기(Potential Transformer)는 기구적인 제약으로 인하여 오차가 크다. 따라서 배전선로 구간부하를 정확하게 산정하기 위해서는 자동화개폐기에서 취득되는 전압 측정치를 정확하게 보정하는 것이 중요하다.

배전선로의 구간부하 산정을 위한 연구는 다양하게 진행되어 왔다. 참고문헌 [1]에서는 측정치의 부정확성을 극복하기 위하여 부하특성곡선을 기반으로 하는 실시간 부하모델링 기법이 제시되었다. 참고문헌 [2]에서는 배전계통에서 지속적인 데이터 측정이 어렵다는 문제점을 해결하기 위하여 퍼지회귀분석법을 통한 배전선로의 최대부하 산정기법이 제시되었다. 참고문헌 [3]에서는 과거 데이터와 실시간 계측 데이터를 기반으로 배전계통의 상태추정과 조류계산을 위한 퍼지 알고리즘 이용하는 방법이 제시되었다. 참고문헌 [4]에서는 최소자승법과 Fortescue 변환을 이용한 대규모 비대칭 배전선로의 부하추정기법이 제시되었다. 이밖에도 최소자승법 기반의 불균형 배전선로의 부하추정기법[5], 신경회로망기법과 퍼지회귀를 이용한 단기 부하 예측 방법 [6], 유전알고리즘을 이용한 단기부하 예측방법[7], wavelet neural network 방법을 이용한 단기부하 예측방법[8], 퍼지귀납추리법을 이용한 단기부하 예측방법[9], 입자군집최적화기법과 인공신경망기법을 이용한 단기부하 예측방법[10] 등에 대한 연구결과가 보고되어 있다.

그러나 이러한 기존의 연구들은 실제계통에서 취득되는 데이터가 측정 위치와 종류에 따라 신뢰도가 다르다는 점이 고려되지 않은 한계가 있다. 선로 인출단의 데이터는 측정 여건이 좋은 변전소에서 취득되기 때문에 정확하고, 자동화개폐기에서도 전압은 오차가 크지만 전류 및 위상은 상대적으로 신뢰도가 높다. 본 논문에서는 정확하고 신뢰도가 높은 데이터를 기반으로 개폐기 측정전압의 오차를 보정하고, 이를 기반으로 구간부하를 산정하는 방법을 제시한다.

## 2. 본 론

### 2.1 배전선로 전압계측 오차

배전선로 자동화개폐기의 전압측정을 위한 계기용변성기에는 CCPD(Coupling Capacitance Potential Device)와 BCPD(Bushing Capacitance Potential Device) 두 가지 방식이 사용된다. CCPD 방식은 여러 개의 직렬로 연결된 콘덴서에 1차측 전압을 인가한 후 콘덴서 하나의 전압을 사용한다. BCPD 방식은 붓싱과 대지간 정전용량을 이용하여 1차측 전압을 분압하여 사용한다. 현재 배전계통에서는 BCPD 방식이 많이 사용되고 있는데 붓싱과 대지간의 정전용량이 일정하지 않아서 전압 크기의 정확성이 낮다. 따라서 전압제어나 구간부하 산정의 용도로 사용하기에는 부적합하다. 다만 과형의 경우에는 왜곡이나 지연이 크지 않으므로 전압과 전류의 위상차는 신뢰할 수 있는 수준이다. 한편 배전선로 인출 CB 전압은 154kV 변전소 2차측의 모선전압이기 때문에 계측여건이 좋아서 신뢰도가 높다.

### 2.2 전압강하에 의한 개폐기 전압추정

본 논문에서는 전압의 측정오차를 보정하기 위하여 자동화개폐기에서 측정된 전류와 위상차를 이용하여 전압강하를 계산한다. 그림 1은 전압강하 계산을 위한 배전선로의 PI 등가모델을 나타내고 있다.

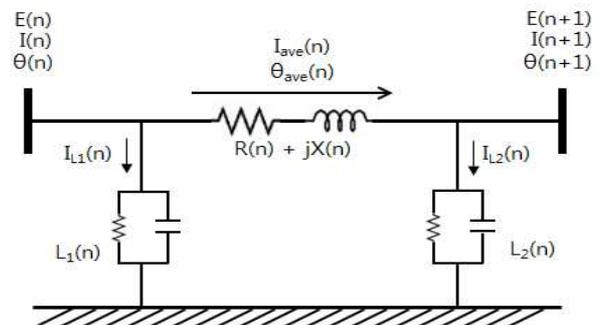


Fig. 1. Voltage Drop of the Section

구간 양단에 동일한 부하가 연결되어 있는 파이 등가모델을 사용하고 있기 때문에 양단의 부하로 빠져

나가는 전류는 동일하다. 따라서 n번째 구간의 전압강하계산에 사용되는 전류  $I_{ave}(n)$ 은 n번째 개폐기에서 측정된 전류  $I(n)$ 과 n+1번째 개폐기에서 측정된 전류  $I(n+1)$ 의 복소수 평균의 크기를 사용해야 한다. 실제 통 배전선로를 대상으로 계산해 보면 장공장 중부하 선로에서도 변전소 인출과 말단의 전압위상차는 5도 미만이다. 부하의 역률도 차등요금으로 관리되고 있으므로 편차가 크지 않다. 따라서 배전선로 한 구간에서 인입전류와 인출전류의 위상차는 크지 않다고 볼 수 있다. 위상각 차가 크기 않은 두 개의 벡터는 복소수 평균의 크기와 각 복소수 크기의 평균이 거의 같다는 특징을 이용하여 n번째 구간의 평균전류를 식 (1)과 같이 인입전류와 인출전류의 크기에 평균으로 계산할 수 있다. 위상차도 같은 이유에서 실용적으로 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$I_{ave}(n) = \frac{I(n) + I(n+1)}{2} \quad (1)$$

$$\theta_{ave}(n) = \frac{\theta(n) + \theta(n+1)}{2} \quad (2)$$

- 여기서  $I_{ave}(n)$  : n번째 구간의 평균전류
- $\theta_{ave}(n)$  : n번째 구간의 평균위상차
- $I(n)$  : n번째 개폐기 전류
- $\theta(n)$  : n번째 개폐기 전압-전류 위상차
- $I(n+1)$  : n+1번째 개폐기 전류
- $\theta(n+1)$  : n+1번째 개폐기 전압-전류 위상차

각 구간에서 발생하는 전압강하는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 단거리배전선로에서 전압강하는 송전단 전압과 수신단 전압의 차로써 구간전류와 임피던스의 곱이다. 송전단 전압과 수신단 전압의 위상차는 매우 작아서 허수부를 무시할 수 있으므로 전압강하를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)에서는 구간의 전류, 위상차 그리고 임피던스를 이용하여 구간에서 발생하는 전압강하의 크기를 계산한다. 전압강하계산을 통해 추정된 개폐기 전압은 식 (4)와 같이 표현된다. 그림 1에서 계산하려는 전압  $E(n+1)$ 은 기존에 계산된 전압  $E(n)$ 와 전압강하  $E_{drop}(n)$ 로부터 계산한다. 첫 번째 개폐기의 전압은 신뢰도가 높은 변전소 모선

전압이므로 측정치를 사용한다.

$$E_{drop}(n) = I_{ave}(n)(R(n)\cos\theta_{ave}(n) + X(n)\sin\theta_{ave}(n)) \quad (3)$$

$$|E(n+1)| = |E(n)| - E_{drop}(n) \quad n = 1, 2, 3, \dots, NB \quad (4)$$

- 여기서  $E_{drop}(n)$  : n번째 구간의 전압강하
- $E(n)$  : n번째 개폐기의 전압
- $E(n+1)$  : n+1번째 개폐기의 추정 전압
- $R(n)$  : n번째 구간의 저항
- $X(n)$  : n번째 구간의 리액턴스
- $I_{ave}, \theta_{ave}$  : 구간의 평균 전류, 평균 위상차

전압강하 계산에 의한 전압오차보정 방법의 유용성은 2.4절 사례연구에서 표 4에 나타내었다. 오차가 거의 없이 정확하게 보정할 수 있음을 알 수 있다. 실제 통에서는 선로 임피던스의 크기와 부하의 분포가 시물레이션과 정확히 일치하지는 않으므로 오차가 증가될 수 있다. 하지만 오차의 범위가 자동화개폐기의 측정오차 범위에 비하여 현저히 작아서 정확하고 실용적이다.

### 2.3 손실을 고려한 구간부하 추정

그림 2는 구간부하 추정방법을 설명하기 위한 배전선로 모델을 나타내고 있다. 그림에서 P(n)과 Q(n)은 n번째 개폐기로 유입되는 전력을 나타낸다.  $P_{loss}(n)$ 과  $Q_{loss}(n)$ 은 n번째 구간의 선로에서 발생하는 유효전력 손실 및 무효전력손실을 나타낸다. 그림에서  $P_{load}(n)$ 과  $Q_{load}(n)$ 은 n번째 구간부하를 나타내며 구간에서 발생하는 손실을 고려해야 한다.

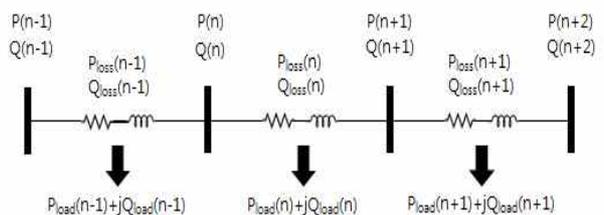


Fig. 2. Section Loading Estimation

배전선로에서 전압측정치의 오차보정을 통한 정확한 구간부하 추정 방법

본 논문에서 계산하고자 하는 구간부하  $P_{load}(n)$  과  $Q_{load}(n)$  은 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{load}(n) = P(n) - P(n+1) - P_{loss}(n) \quad (5)$$

$$Q_{load}(n) = Q(n) - Q(n+1) - Q_{loss}(n) \quad (6)$$

여기서  $P_{load}(n)$  : n번째 구간의 추정 유효 전력  
 $Q_{load}(n)$  : n번째 구간의 추정 무효 전력  
 $P(n)$  : n번째 개폐기의 유효전력  
 $Q(n)$  : n번째 개폐기의 무효전력  
 $P(n+1)$  : n+1번째 개폐기의 유효전력  
 $Q(n+1)$  : n+1번째 개폐기의 무효전력  
 $P_{loss}(n)$  : n번째 구간의 유효전력손실  
 $Q_{loss}(n)$  : n번째 구간의 무효전력손실

실계통에서 P(n)과 Q(n)은 개폐기의 측정 데이터를 기반으로 계산한 값으로서 전압 측정치 오차를 보정하는 방법은 2.2절에 설명하였다.  $P_{loss}(n)$ 과  $Q_{loss}(n)$ 은 각각 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$P_{loss}(n) = 3I_{ave}(n)^2 R(n) \quad (7)$$

$$Q_{loss}(n) = 3I_{ave}(n)^2 X(n) \quad (8)$$

여기서  $P_{loss}(n)$  : n번째 구간의 유효전력손실  
 $Q_{loss}(n)$  : n번째 구간의 무효전력손실  
 $I_{ave}$  : 평균 구간전류  
 $R, X$  : 구간 저항과 리액턴스

## 2.4 사례연구

본 논문에서 제안하는 구간부하 추정 방법의 유용성을 검증하기 위해 Matlab Simulink Power System Toolbox를 이용한 시뮬레이션 사례연구를 수행하였다. 그림 3은 4개의 개폐기로 구성된 예제 배전계통을 나타낸다.

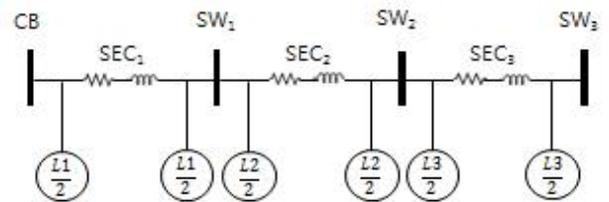


Fig. 3. Test System for Case Study

그림 4는 그림 3 예제 배전계통의 매틀랩 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다. 표 1은 매틀랩 시뮬레이션 입력데이터로서 각 구간의 공장과 임피던스를 나타낸다. 배전선로의 전력선은 ACSR-160mm<sup>2</sup>를 사용한 것으로 상정하였다.

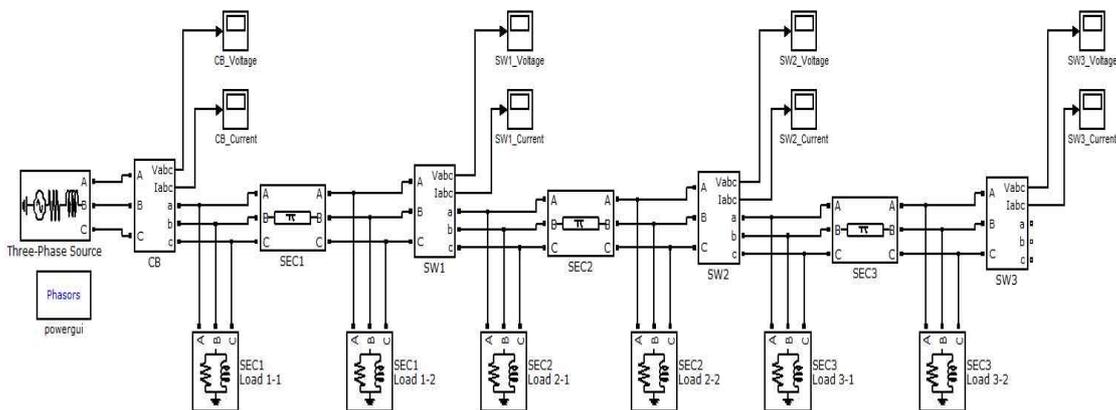


Fig. 4. Matlab Simulation Model

Table 1. Length and Positive Z of Each Section

구간	SEC <sub>1</sub>	SEC <sub>2</sub>	SEC <sub>3</sub>
공장(km)	3	3	4
R(Ω/km)	0.2024	0.2024	0.2024
X(Ω/km)	0.3891	0.3891	0.3891

표 2는 매틀랩 시뮬레이션의 입력 데이터로서 사용된 구간부하량을 나타낸다.

Table 2. Input Section Loading Data

구간	SEC <sub>1</sub>	SEC <sub>2</sub>	SEC <sub>3</sub>
유효전력(kW)	3618.82	3458.91	1807.37
무효전력(kVar)	1542.06	1675.83	594.23

표 3은 매틀랩 시뮬레이션 결과로서 개폐기 설치점의 전압, 전류 및 위상차를 나타내고 있다. 실계통 전압 측정치에 오차가 커서 정확한 값을 알 수 없다.

Table 3. Simulated V and I of the Switches

개폐기	CB	SW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>
전압(V)	13212.01	13009.36	12910.77	12879.91
전류(A)	197.35	98.21	24.55	말단
위상차(°)	23.94	23.57	18.27	말단

표 4는 두 번째 행의 매틀랩 시뮬레이션을 통해 얻은 개폐기의 전압과 세 번째 행의 식 (4)를 이용하여 추정한 전압의 비교 결과를 나타낸다. 다섯 번째 행의 오차율에서 보는 바와 같이 계산에 의한 추정전압과 시뮬레이션 전압 사이의 오차는 매우 작아서 식 (4)를 이용한 전압추정이 매우 간단하면서도 정확함을 알 수 있다.

Table 4. Accuracy of Calculated Voltage Drop

개폐기	SW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>
시뮬레이션(V)	13009.36	12910.77	12879.91
계산치(V)	13009.08	12912.17	12881.27
오차(V)	0.28	1.40	1.36
오차율(%)	0.002	0.01	0.01

표 5과 6은 시뮬레이션 전압, 전류 및 위상차를 기반으로 계산한 개폐기의 유효전력과 무효전력을 나타낸다.

Table 5. Active Power of Switches

개폐기	CB	SW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>
시뮬레이션(kW)	8975.57	5286.58	1808.80	말단
계산(kW)	8975.57	5286.47	1809.00	말단
오차(kW)	0	0.11	0.20	말단
오차율(%)	0	0.002	0.01	말단

Table 6. Reactive Power of Switches

개폐기	CB	SW <sub>1</sub>	SW <sub>2</sub>	SW <sub>3</sub>
시뮬레이션(kVar)	3985.01	2306.35	597.15	말단
계산치(kVar)	3985.01	2306.30	597.21	말단
오차(kVar)	0	0.05	0.06	말단
오차율(%)	0	0.002	0.01	말단

표 7은 식 (7)과 (8)을 이용하여 계산한 각 구간의 유효전력손실과 무효전력손실을 나타낸다.

Table 7. Power Loss of the Sections

구간	SEC <sub>1</sub>	SEC <sub>2</sub>	SEC <sub>3</sub>
유효전력손실(kW)	71.26	17.66	1.46
무효전력손실(kVar)	136.98	33.96	2.82

표 8은 최종적으로 추정된 구간부하를 나타낸다. 표의 두 번째 행과 다섯 번째 행에 나타난 입력치는 처음 매틀랩 시뮬레이션의 입력으로 사용된 데이터이다. 표의 세 번째 행과 여섯 번째 행에 나타난 추정치가 좌측의 입력치 사이에 오차가 매우 작으므로 추정치가 정확함을 알 수 있다. 이상의 사례 연구를 통하여 본 논문에서 제안하는 전압 측정치 보정을 통한 구간부하 추정방법이 유용함을 알 수 있다.

Table 8. Accuracy of Estimated Section Loading

구간		SEC <sub>1</sub>	SEC <sub>2</sub>	SEC <sub>3</sub>
유효 전력 (kW)	입력	3618.82	3458.91	1807.37
	추정	3618.03	3459.80	1807.53
	오차율(%)	0.02	0.02	0.008
무효 전력 (kVar)	입력	1542.06	1675.83	594.23
	추정	1541.72	1675.12	594.39
	오차율(%)	0.02	0.04	0.02

### 3. 결 론

배전선로의 구간부하는 배전계통 운영에 사용되는 운전지원 어플리케이션들의 기반이 되므로 매우 중요하다. 구간부하는 자동화개폐기에서 취득하는 전압 전류로부터 계산된다. 그런데 자동화개폐기에서 취득되는 전압은 기구적인 제약으로 매우 큰 오차를 포함하고 있다. 본 논문에서는 전압강하 계산을 통하여 개폐기 전압의 오차를 보정하는 방법과 손실계산을 통하여 구간부하를 추정하는 방법을 제시하였다. 또한 매트랩 시뮬레이션 사례연구를 통하여 본 논문에서 제시한 방법이 매우 정확하게 구간부하를 산정할 수 있음을 확인하였다.

### References

[1] A. K. Ghosh, D. L. Lubkeman, R. H. Jones, "Load modeling for distribution circuit state estimation," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 999-1005, Apr. 1997.

[2] J. Nazarko and W. Zalewski, "The fuzzy regression approach to peak load estimation in power distribution systems," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 809-814, Aug. 1999.

[3] A. T. Saric and R. M. Ciric, "Integrated fuzzy state estimation and load flow analysis in distribution networks," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 571-578, April. 2003.

[4] I. Dzafic, M. Gilles, R. A. Jabr, B. C. Pal, S. Henselmeyer, "Real Time Estimation of Loads in Radial and Unsymmetrical Three-Phase Distribution Networks," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 28, No. 4, pp. 4839-4848, Nov 2013.

[5] W. Jie and K. N Miu, "Weighted least squares methods for load estimation in distribution networks" IEEE Trans. Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1338-1345, Nov. 2003.

[6] T. Senjyu, P. Mandal, K. Uezato, T. Funabashi, "Next day

load curve forecasting using hybrid correction method," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 102-109, Feb. 2005.

[7] S. H. Ling, F. H. F. Leung, H. K. Lam, P. K. S. Tam, "Short-term electric load forecasting based on a neural fuzzy network," IEEE Tans. Industrial Electronics, Vol. 50, No. 6, pp. 1305-1316, Dec. 2003.

[8] Y. Chen, P. B. Luh, C. Guan, Y. Zhao, L. D. Michel, M. A. Coolbeth, P. B. Friedland, S. J. Rourke "Short-Term Load Forecasting: Similar Day-Based Wavelet Neural Networks" IEEE Trans, Power Systems Vol. 25, No. 1. pp. 322-330, Feb. 2010.

[9] V. H. Hinojosa, A. Hoses "Short-Term Load Forecasting Using Fuzzy Inductive Reasoning and Evolutionary Algorithms" IEEE Trans Power Systems Vol. 25, No. 1, pp. 565-574, Feb. 2010.

[10] Z. A. Bashir, M. E. El-Hawary "Applying Wavelets to Short-Term Load Forecasting Using PSO-Based Neural Networks" IEEE Trans Power Systems Vol. 24, No. 1, pp. 20-27, Feb. 2009.

### ◇ 저자소개 ◇



#### 박재형(朴宰亨)

1990년 10월 7일생. 2014년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 첨단 공학과 석사과정.  
Tel : (055)249-2630  
E-mail : pjh2981@gmail.com



#### 전철우(全哲佑)

1989년 6월 29일생. 2014년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 첨단 공학과 석사과정.  
Tel : (055)249-2630  
E-mail : jcw8928@gmail.com



#### 임성일(林星日)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기 공학과 석사과정 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남 대학교 전기공학과 교수.  
Tel : (055)249-2630  
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr