

일부하 곡선을 이용한 배전계통 구간부하 관리방법

(A Section Load Management Method using Daily Load Curve in Distribution Systems)

임성일*

(Seongil Lim)

Abstract

DAS(Distribution Automation System) is equipped with several software applications such as service restoration, loss minimization, and protective relay coordination. The software applications of DAS are very sensitive to the amount of section load being carried by a particular section of distribution lines. Moreover, each software application requires a different parameter of the section load according to its purpose. Therefore, This paper proposes a new section load management method using real-time measurement data of the distribution lines. In order to provide accurate data to DAS applications, this method considers section loads in terms of the relationship of power versus time. In order to establish that the proposed method is feasible, a performance-testing simulator was developed, and case studies were conducted for a modified real distribution network.

Key Words : DAS, Load Curve, Service Restoration, CIM

1. 서 론

배전자동화시스템은 배전선로에 설로되어 있는 자동화 개폐기를 원격에서 감시 또는 제어하는 시스템이다. 배전자동화 시스템의 가장 핵심적인 기능은 평상시 배전계통의 손실을 최소화하고, 비상시 신속히 고장 구간을 검출, 분리하고 전력 공급을 재개하는 것이다. 이러한 기능을 수행하기 위해 배전자동화 시스템에는 정전복구, 상시개방점 최적화, 보호협조 등의

다양한 어플리케이션들이 탑재되어 있다. 어플리케이션들은 모두 구간부하 데이터를 기반으로 운영되기 때문에 배전자동화시스템에서 구간부하를 정확히 관리하는 것은 매우 중요하다. 또한 어플리케이션에 따라 사용되는 구간부하의 종류가 최대치, 평균치, 최소치, 시간에 따른 곡선 등으로 다양하기 때문에 용도에 맞게 적합한 구간부하 데이터가 제공되어야 한다. 다양한 용도로 구간부하를 가공하기 위해서는 시간에 따라 변하는 부하곡선의 형태로 관리하는 것이 바람직하다. 현재의 배전자동화시스템은 구간의 부하를 일부하곡선으로 관리하지 않고 최대치를 기반으로 하는 하나의 대푯값으로 나타내고 있다. 따라서 배전자동화시스템 어플리케이션들이 용도에 맞는 적합한 구간부하를 입력 데이터로 제공받지 못하기 때문에 정

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-249-2630, Fax : 0505-999-2161
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2012년 3월 21일
1차심사 : 2012년 3월 23일, 2차심사 : 2012년 5월 1일
심사완료 : 2012년 5월 25일

확한 솔루션을 생성하기 어렵다는 단점이 있다.

부하 관리하는 방법에 관한 연구는 다양하게 진행되어 왔다. 신경회로망과 퍼지 추론 기법을 이용한 방법 [1], 신경회로망을 이용한 방법[2], 최소 자승법을 이용한 방법[3-4], 상태추정 기법을 이용한 방법[5-6], PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 이용한 방법[7] 등이 대표적이다. 그러나 대부분의 연구들은 실시간 데이터를 측정할 수 있는 지점이 제한적이어서 월간 최대 부하나 변압기 최대 부하 분석을 통해 부하를 추정하였기 때문에 부하 데이터 추정결과가 부정확하였다.

본 논문에서는 배전계통에 설치되어 있는 단말장치에서 실시간에 측정되는 전압, 전류 및 위상차 데이터를 이용하여 구간의 부하를 일부하 곡선으로 관리하는 방법을 제시한다. 또한 측정 데이터에 오류가 포함된 경우에 이를 보정하는 방법도 제시한다. 구간부하는 대부분의 어플리케이션들이 공통으로 사용하기 때문에 TC57에서 정의하고 있는 CIM을 기반으로 하여 표준화된 데이터모델을 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1장은 기존 배전계통 부하관리의 문제점에 대해서 설명한다. 2.2장에서는 구간부하 및 구간부하 곡선을 계산하는 방법에 대해 설명한다. 2.3장에서는 사례연구를 통해 구간부하 및 부하패턴 계산의 정확성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 기존 배전계통 부하관리의 문제점

현재 배전자동화시스템에서도 개폐기에서 측정된 실시간 데이터를 기반으로 구간부하를 관리하고 있는 하지만, 구간의 부하를 일부하 곡선이 아니고 최대치를 기반으로 하는 하나의 대푯값으로 표현하고 있다. 이것은 다양한 어플리케이션들에게 적절한 형태의 부하 데이터를 제공하지 못함으로써 많은 문제점을 야기하는데 그 대표적인 예가 배전선로 정전복구 어플리케이션이다. 각 구간은 피크부하의 발생시간이 다르기 때문에 최대치를 더하게 되면 실제보다 큰 값으로 정전 부하량을 산정하게 된다. 그림 1에서 예를

들어 설명하면 다음과 같다. 개폐기 S_1 와 S_3 사이에서 고장이 발생하면, 개폐기 S_3 , S_6 , S_7 로 둘러싸여 있는 정전구역이 발생한다. 기존의 정전복구 프로그램이 사용하는 부하 데이터 대표값은 최대치이기 때문에 정전부하량은 8,000[kVA], 연계선로 DL_3 의 공급부하량은 10,000[kVA]이 된다. 배전선로의 비상시 최대공급 용량은 14,000[kVA]라 하면, 연계선로 DL_3 의 공급 여유용량은 4,000[kVA]가 되고, 정전부하량이 공급여유용량보다 크기 때문에 정전복구가 불가능하다. 그러나 실제로는 정전부하량 곡선과 연계선로 DL_3 부하량 곡선을 시간대별로 합산하면, 부하절체 이후의 부하곡선 최대치가 12,000[kVA]에 불과하여 연계선로 DL_3 을 이용한 정전복구가 가능하다.

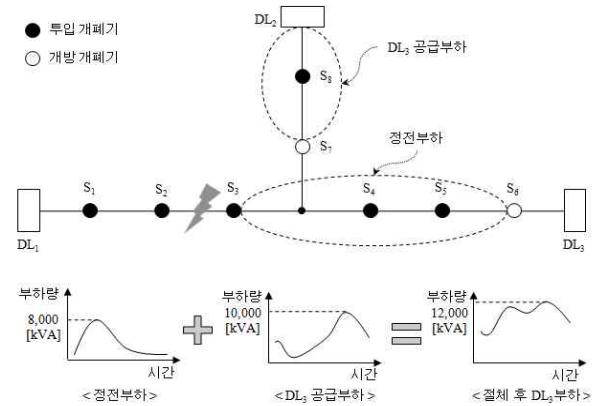


그림 1. 기존 정전복구의 문제점
Fig. 1. Problem of Conventional Service Restoration

2.2 부하곡선 기반의 구간부하 관리

그림 2는 제안하는 구간부하 관리방법의 서비스 체계를 나타내고 있다.

부하관리 프로그램은 배전선로 FRTU(Feeder Remote Terminal Unit)으로 부터 전압, 전류 및 위상차 데이터를 취득한다. 구간부하는 실시간 어플리케이션이 사용하는 데이터로서, 상태추정 프로그램의 입력으로 사용된다. 상태추정 프로그램은 구간부하 데이터의 오차를 보정하여 조류계산, 전압제어 프로그램에 부하 데이터를 제공한다. 고장과 같은 이벤트가 발생하였을 때 동작하는 어플리케이션들은 요구하는 부

하 데이터가 다르기 때문에, 구간부하곡선을 이용하여 어플리케이션이 필요로 하는 데이터를 생성하여 제공한다.

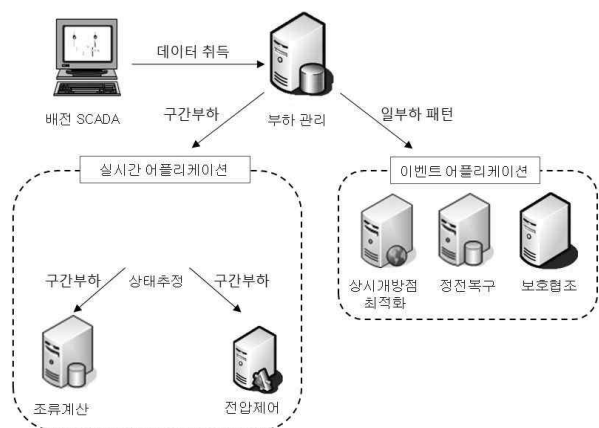


그림 2. 구간부하 관리체계
Fig. 2. Structure of Section Load Management

일반적인 배전계통은 분기점, 수동 개폐기가 존재하며, 분기점이나 수동개폐기에서는 데이터가 측정되지 않는다. 따라서 자동화 개폐기에서 측정된 데이터를 기반으로 자동화개폐기 단위의 구간부하를 계산한 후, 부하분할계수를 이용하여 수동개폐기 및 분기점 단위의 구간부하로 분배한다.

2.2.1 구간부하 산정 방법

먼저, 설명을 용이하게 하기 위하여 그림 3을 이용하여 구간과 구역을 정의한다. 구간은 자동개폐기, 수동개폐기 또는 분기점으로 둘러싸인 선로의 부분이고

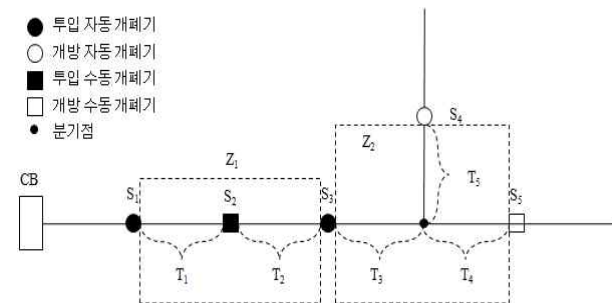


그림 3. 구간과 구역의 정의
Fig. 3. Definition of Section and Zone

으로 나타내고 있다. 구역은 자동화개폐기 또는 개방점으로 둘러싸여 있는 선로의 부분이고 Z로 나타내고 있다. 구역은 한 개 이상의 구간으로 구성된다.

그림 4에서 보는 바와 같이 각 구간에서 소비되는 부하량은 전원측 개폐기 통과전력 P_k, Q_k 와 부하측 개폐기 통과전력 P_{k+1}, Q_{k+1} 의 차이에 구간의 배전선로 손실을 감하여 계산한다. 개폐기 통과전력은 측정된 전압, 전류 및 위상차를 이용하여 계산한다.

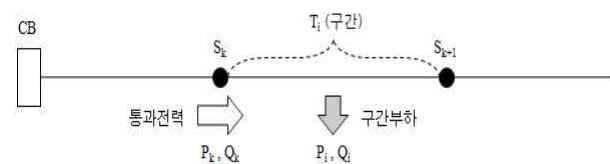


그림 4. 구간부하 계산
Fig. 4. Section Load Calculation

식 (1)은 k 번째 개폐기 S_k 를 통과하는 유효전력과 무효전력을 나타내고 있다.

$$P_k + jQ_k = \sqrt{3} V_k I_k \cos \theta_k + j \sqrt{3} V_k I_k \sin \theta_k \quad (1)$$

균등분포 부하에서 구간 i 의 손실 PL_i 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$PL_i = \frac{1}{3} R_i \left(\frac{I_k + I_{k+1}}{2} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 R_i 구간 i 의 선로저항을 나타내고 I_k, I_{k+1} 은 각각 $k, k+1$ 개폐기에 흐르는 전류를 나타낸다.

구간 i 에서 소비되는 전력 P_i 와 Q_i 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$P_i + jQ_i = (P_k - P_{k+1} - PL_i) + j(Q_k - Q_{k+1}) \quad (3)$$

수동개폐기나 분기점에는 전압, 전류 및 위상차를 측정할 수 없으므로 측정점이 있는 자동화개폐기로 둘러싸인 구역의 전력을 계산하면 식 (4)와 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$P_j = P_k - \sum_{d=1}^n P_d - PL_j \quad (4)$$

$$Q_j = Q_k - \sum_{d=1}^n Q_d \quad (5)$$

여기서 j 는 구역 번호, k 는 전원측 개폐기, d 는 부하측의 모든 개폐기를 나타낸다.

식 (4)와 식 (5)에서 계산된 구역의 전력을 소속된 구간의 전력으로 분할하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i + jQ_i = \alpha_i (P_j + jQ_j) \quad (6)$$

여기서 i 는 구간번호, j 는 구역번호, α_i 는 부하분할 계수를 나타낸다.

식 (6)에서 α_i 는 부하분할계수로서 다음과 같이 계산된다. 먼저, 구간의 설비용량 E_i 는 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i = H_i + L_i \times \beta_i \quad (7)$$

여기서 H_i 는 고압수용가의 계약전력, L_i 는 저압수용가의 변압기용량 그리고 β_i 는 이용률을 나타낸다.

부하분할계수는 하나의 구역에 대하여 소속된 구간의 설비용량을 식 (8)와 같이 정규화하여 사용한다.

$$\alpha_i = \frac{E_i}{\sum_{j=1}^n E_j} \quad (8)$$

여기서 j 는 구간 i 가 소속된 구역의 모든 구간을 나타낸다.

고압수용가의 계약전력이나 저압수용가의 변압기용량은 실제 부하량과 달라서 부하분할 계수로 사용하기에는 적합하지 않다. 그러나 한전의 NDIS에서 확보할 수 있는 데이터 중에서는 그나마 가장 근접하게 부하의 분포를 나타내고 있기 때문에 채택하였다. 기존의 부하관리에서 균등배분으로 나누거나 공장 비율로 분할한 것에 비하여 개선되었다고 할 수 있다. 향후 전자식 전력량계나 스마트 미터의 보급이 확대되면 좀 더 실제적인 부하분할 계수를 확보할 수 있다.

2.2.2 오류데이터 처리방법

단말장치에서 측정되는 전압, 전류치는 중앙제어장치로 전송되는 과정에서 통신장치의 고장으로 데이터가 누락되거나 통신잡음이 포함되는 등 데이터 오류가 발생할 수 있다. 데이터가 누락되었거나 신뢰할 수 없다고 판단되는 경우에는 기존에 계산된 구간 부하곡선을 사용하여 대체 값을 생성하는데 그 절차는 다음과 같다. 먼저 오류 데이터를 전송한 자동개폐기는 수동개폐기로 취급한다. 오류 자동개폐기가 연결된 2개의 구역은 하나로 합쳐져서 더 넓은 새로운 구역이 된다. 구역의 부하량을 산정하고 구간의 부하량으로 분할할 때 기존에 계산된 동일시간대의 부하곡선을 참고하여 부하분할 계수를 생성한다. 그림 5에서 S_2 에 오류가 포함되면 T_1 , T_2 를 합쳐서 구역을 생성하고 S_1 , S_3 에서 측정된 전력을 기반으로 구역의 부하를 산정하고 부하곡선을 이용하여 분할한다.

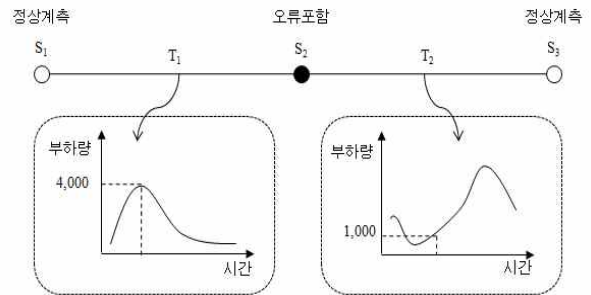


그림 5. 오류 데이터 처리
Fig. 5. Bad Data Processing

2.2.3 부하곡선 계산 및 관리 방법

정전복구, 상시연계점 최적화, 보호협조 등 배전자동화시스템의 다양한 어플리케이션들이 부하 데이터를 사용하기 위해서 CIM 표준 부하모델을 채택하였다. 따라서 CIM에서 제공하는 부하모델을 기반으로 하여 일부하 패턴을 관리한다. CIM에서는 부하를 요일(월, 화, 수, 목, 금, 토, 일/공휴일1/공휴일2) 5가지와 계절(봄/여름/가을/겨울) 4가지를 조합하여 총 20가지 유형으로 관리하고 있다. CIM은 송전계통을 포함하여 전력계통 전반에서 활용하기 위하여 매우 세밀하게 분류하고 있다. 본 연구는 배전계통이 대상이므로 구간의 부하량이 상대적으로 작아서 매일의 변화가 크

기 때문에 세밀하게 분류하여도 큰 장점을 얻을 수 없다. 따라서 시스템의 메모리 제약과 연산속도를 고려하여 평일과 공휴일 정도로만 분류하고 여기에 4계절을 곱하여 총 8가지 곡선으로 분류한다. 부하곡선은 시간 간격이 일정한 스케줄 데이터로 구성하였으며, 시간 간격은 1시간으로 하였다. 그림 6은 부하곡선 관리 체계를 나타내고 있다. 상태추정이 계산한 구간부하는 어플리케이션들이 사용하는 데이터베이스에 저장된다. ACM에 저장되는 구간부하는 히스토리컬 데이터베이스에 저장되고 계속 누적된다. 부하패턴 갱신 주기가 일주일이기 때문에 히스토리컬 데이터베이스에 저장되어 있는 일주일 누적 데이터를 취득하여, 부하관리 어플리케이션이 주중과 주말의 부하곡선을 계산한다.

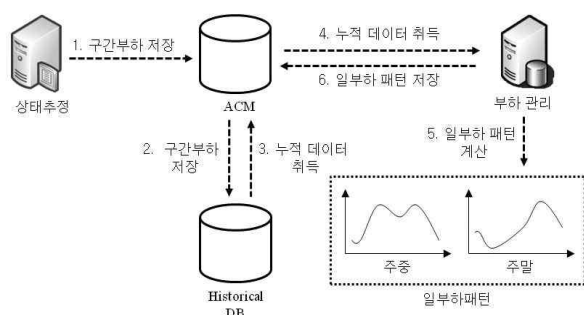


그림 6. 부하곡선 계산 체계
Fig. 6. Structure of Load Curve Calculation

2.3 사례연구

그림 7은 사례연구 절차도로서 제안하는 구간부하 관리 기법의 유용성을 다음과 같이 검증하였다. 먼저 예계제통도의 각 구간에 임의의 부하곡선을 지정한다. 각 시간대별 부하량과 선로임피던스를 입력으로 조류계산을 수행하여 각 개폐기의 전압, 전류 및 위상차를 계산한다. 다시 각 개폐기의 전압, 전류 및 위상차를 입력으로 부하관리 모듈을 수행하여 각 구간의 부하곡선을 계산한다. 만약 초기에 임의로 지정된 부하곡선과 부하관리 모듈이 계산한 부하곡선이 같다면 본 논문에서 제안하는 구간부하 관리기법이 유용하다고 볼 수 있다.

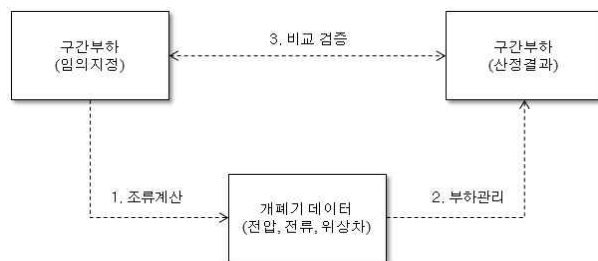


그림 7. 유효성 검증 절차
Fig. 7. Procedure of Feasibility Verification

그림 8은 사례연구에 사용된 예제 배전선로를 나타내고 있다. 제주도 스마트그리드 실증단지의 애월선로를 축약한 것으로 6개의 자동개폐기와 6개의 구간으로 구성된다.

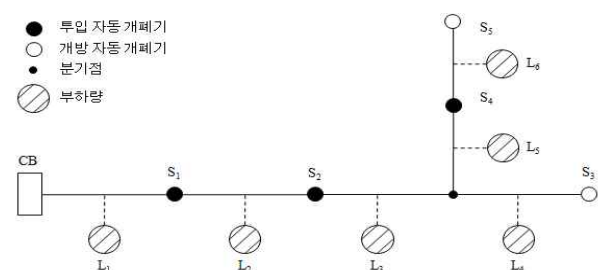


그림 8. 예제 배전선로
Fig. 8. Example Distribution Feeder

표 1. 구간부하 입력 데이터
Table 1. Input section loads P(kW), Q(kvar)

시간	SEC	L1		L2		L3		L4		L5		L6	
		P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
13:00		539	169	68	21	47	14	188	58	47	14	319	100
13:30		515	164	71	22	47	15	189	60	47	15	323	103
14:00		521	165	65	20	47	14	188	59	47	14	319	101
14:30		541	164	77	23	47	14	188	57	47	14	346	104
15:00		545	168	71	22	46	14	185	57	46	14	334	103

표 1은 각 구간에 임의로 배정한 부하곡선의 일부를 나타내고 있다. 임의 부하곡선은 제주도 실계통에서 측정된 데이터를 가공하여 생성하였다.

표 2는 표 1의 부하량을 입력으로 하고 조류계산을 수행하여 계산한 각 개폐기의 전압, 전류 및 위상차를 나타내고 있다. 제안된 구간별 부하관리 모듈이 실계통에 적용되면 각 개폐기의 전압, 전류 및 위상차 데이

터는 FRTU 단말장치로부터 측정하게 된다.

표 2. 전압, 전류, 위상차 계산결과(14:00 기준)
Table 2. V, I and angle calculation results at 14:00

변수 개폐기	V [V]	I [A]	θ [도]
S1	13064	84.9	17.78
S2	13043	80.0	17.69
S4	13041	25.7	17.64

표 3은 표 2의 개폐기 데이터를 입력으로 하고 본 연구에서 제안된 구간별 부하관리 모듈을 수행하여 계산한 각 구간의 부하곡선이다.

표 3. 추정된 구간부하
Table 3. Estimated section loads P(kW),Q(kvar)

시간	L1		L2		L3		L4		L5		L6	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
13:00	511	182	65	23	46	14	184	59	46	14	306	100
13:30	488	177	68	24	46	15	186	61	46	15	308	103
14:00	493	178	62	23	46	15	185	60	46	15	306	101
14:30	511	178	75	26	46	14	184	57	46	14	330	105
15:00	516	181	68	24	45	14	182	58	45	14	319	103

표 3의 계산결과 부하곡선을 표 1의 초기에 지정한 부하곡선과 비교해 보았을 때 조류계산 모듈의 선로 손실 처리과정에서 발생하는 약간의 오차를 감안하면 대체로 일치된다. 따라서 본 논문에서 제시한 구간별 부하관리 방법을 적용하면 개폐기에서 측정된 전압, 전류 및 위상차 데이터로부터 구간의 부하곡선을 정확히 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 배전선로 단말장치로부터 취득되는 실시간 측정치를 기반으로 시간에 따라 변하는 구간의 부하량을 정확히 관리하는 방법을 제시하였다. 조류계산 프로그램을 이용한 사례연구를 통하여 제안한 부하관리 기법의 유용성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 부하관리 기법을 배전자동화 시스템에 적용하

면 정전복구, 보호협조, 최적화 등의 어플리케이션에 적합한 데이터를 제공함으로써 배전선로 운영의 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 경남대학교 신진교수 연구비 지원에 의한 것임.

References

- [1] D. M. Falcao and H.O. Henriques, "Load Estimation in Radial Distribution Systems using Neural Networks and Fuzzy Set Techniques," Proceeding of IEEE/PSE 2001 Summer Meeting, Vol. 2, pp. 1002-1006, July. 2001.
- [2] A. V. Salvador and A. B. Carlos, "Hybrid Demand Model for Load Estimation and Short Term Load Forecasting in Distribution Electric Systems," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp. 764-769, April. 2000.
- [3] W. Jie and N. M. Karen, "Weighted Least Squares Method for Load Estimation in Distribution Networks," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1338-1345, Nov. 2003.
- [4] L. Ramesh, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, A. A. Natarajan, G. A. Taylor and Y. H. song, "Intelligent Approach for Distribution System Load Estimation," Proceeding of IEEE/PSE 2007 General Meeting, pp. 1-7, June. 2007.
- [5] M. E. Baran and A. W. Kelley, "State Estimation for Real-Time Monitoring of Distribution Systems," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1601-1609, Aug. 1994.
- [6] M. E. Baran, "Load Estimation for Distribution System Analysis," Proceeding of IEEE/PSE 2001 Summer Meeting, Vol. 2, pp. 999-1001, July. 2001.
- [7] Z. A. Bashir and 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 ◇



임성일 (林星日)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수.

Tel : (055)249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr