실시간 계측 데이터를 이용한 배전계통 구간부하 관리 방법

손주환*, 김병구*, 임성일*
경남대학교*

Method of Load Management in Distribution Networks Using the Real-Time Measured Data

Ju-Hwan Son*, Byeong-Goo Kim*, Seong-Il Lim*
Kyungnam University*

Abstract - 배전계통을 효율적으로 운영하기 위해 배전자동화 시스템에는 여러 어플리케이션들이 탑재되어 있다. 대부분의 어플리케이션들은 그 기능을 수행하기 위해 기본적으로 부하 데이터를 필요로 한다. 현재 배전계통 부하 관리는 제한적인 데이터를 이용해 산정하고, 하나의 값으로 관리되고 있다. 그 결과 어플리케이션들의 기능을 효율적으로 사용하지 못하고 있다. 본 논문에서는 실시간 측정 데이터를 이용하여 부하데이터를 관리하는 방법을 제안하여 부하 데이터의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고 있다.

1. 서 론

배전자동화 시스템은 배전선로에 흩어져 있는 자동화 개폐기를 원격으로 감시하고 제어하는 시스템이다. 배전자동화 시스템에는 정전복구, 상시 개방점 최적화, 보호협조 등 여러 응용 소프트웨어 들이 탑재되어 있다. 이러한 어플리케이션들은 모두 구간부하 데이터를 필요로 하기 때문에 구간부하 추정은 반드시 필요하다. 그리고 어플리케이션들은 그 특징에 따라 사용하는 구간부하가 다르기 때문에 어플리케이션에 적합한 구간부하를 제공할 수 있어야 한다. 따라서 구간부하는 시간에 따른 프로파일로 관리되어야 한다. 현재 구간부하 관리는 통계학적 분석 또는 계약 전력을 기반으로 이루어지고 있기 때문에, 시간에 따른 프로파일이 아니라 단일값으로 관리되고 있다. 그 결과 배전자동화 시스템 어플리케이션들에 적합한 구간부하를 제공하지 못해 어플리케이션들의 기능을 제대로 사용할 수 없었다.

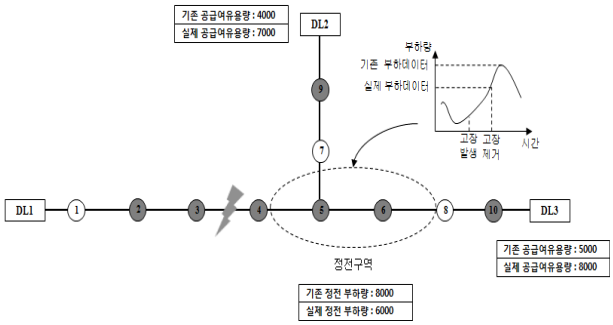
부하 관리에 관한 연구로는 신경회로망과 퍼지 셋 기술을 이용한 방법[1], 최소 자승법을 이용한 방법[3] 그리고 상태추정 기법을 활용한 방법[5]등이 이루어 졌다. 이러한 연구들은 제한된 측정 데이터를 이용하여 부하를 추정하는 방법으로 부하 추정의 정확성이 떨어진다. 본 논문에서는 배전계통에 설치되어 있는 FRTU로부터 실시간으로 측정되는 각 상별 전압, 전류, 전압-전류 위상차 데이터를 이용하여 구간부하를 추정하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1장은 기존 배전계통 부하관리의 문제점에 대해서 설명한다. 2.2장에서는 실측치를 이용하여 구간부하를 계산하는 방법에 대해 설명한다. 2.3장에서는 부하패턴을 계산하고 관리하는 방법에 대해 설명한다. 2.4장에서는 사례연구를 통해 구간부하 및 부하패턴 계산의 정확성을 검증 한다

2. 본 론

2.1 기존 배전계통 부하관리의 문제점

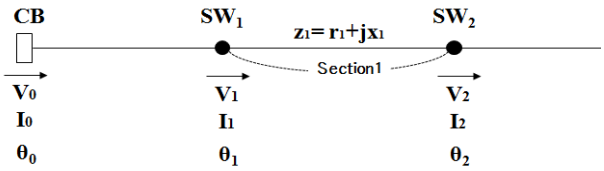
현재 배전계통의 부하관리는 개폐기에서 측정된 전류를 기반으로 부하량을 산정하고, 패턴이 아닌 하나의 값으로 관리하고 있다. 패턴이 아닌 하나의 값으로 구간부하를 관리할 경우 다양한 어플리케이션들은 그 기능을 제대로 수행하지 못한다. 그 대표적인 예로 정전복구 프로그램을 들 수 있다. 그림 1은 정전복구 실행 시 현재 배전계통 부하관리의 문제점을 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 것처럼 개폐기 SW_3과 SW_4 사이에 고장이 발생하면, 개폐기SW_4, SW_7, SW_8로 둘러싸여 있는 정전구역이 발생한다. 정전구역의 부하량과 연계선로의 공급여유용량을 계산할 때 사용되는 부하 데이터는 고장이 발생해서 제거 될 때까지 걸리는 시간 사이의 부하 데이터 중에서 최대치를 사용한다. 실제 DL_2와 DL_3의 공급여유용량은 7000[kVA], 8000[kVA] 그리고 정전구역의 부하량은 6000[kVA]이다. 정전구역의 부하량이 연계선로 DL_2, DL_3의 공급여유용량보다 작기 때문에 복구가 가능하다. 그러나 기존의 부하 데이터를 사용할 경우, 연계선로 DL_2와 DL_3의 공급여유용량은 각각 4000[kVA], 5000[kVA] 그리고 정전구역의 부하량은 8000[kVA]이다. 따라서 복구가 가능 하지만 잘못된 부하 데이터로 인해 복구 할 수 없게 된다.



<그림 1> 정전복구시 문제점

2.2 실측치를 이용한 구간부하 계산

자동 개폐기에서 측정되는 전압, 전류, 전압-전류 위상차 데이터를 이용하여 구간의 부하를 계산한다. 하나의 구간에는 2개의 개폐기가 연결되어 있으며 변전소 인출단에 가까이 있는 개폐기를 전원 측 개폐기, 멀리 있는 개폐기를 부하 측 개폐기라고 한다. 전원측 개폐기의 유효전력과 무효전력에서 부하측 개폐기의 유효전력과 무효전력을 빼주면, 손실을 포함한 구간의 부하량을 계산할 수 있다. 그림 2에서 보는 것처럼 구간1의 부하량을 P_L, Q_L이라고 한다면, 전원측 개폐기인 SW_1의 P_1, Q_1에서 부하측 개폐기 SW_2의 P_2, Q_2 그리고 구간에서 발생한 손실 P_{LOSS}, Q_{LOSS}를 빼주면 된다.



<그림 2> 구간부하 계산 방법

$$P_i + jQ_i = \sqrt{3}\, V_i I_i COS\theta_i + j\sqrt{3}\, V_i I_i SIN\theta_i \quad (1)$$

$$P_{lossk} + jQ_{lossk} = r_k\left(\frac{I_i + I_{i+1}}{2}\right)^2 + jx_k\left(\frac{I_i + I_{i+1}}{2}\right)^2 \quad (2)$$

$$P_{L1} + jQ_{L1} = (P_1 - P_2 - P_{loss1}) + j(Q_1 - Q_2 - Q_{loss1}) \quad (3)$$

일반적인 배전계통은 분기점, 수동 개폐기가 존재하며, 분기점이나 수동개폐기에서는 데이터가 측정되지 않는다. 따라서 자동화 개폐기에서 측정된 데이터를 기반으로 하여 구역의 부하를 계산한 후, 부하분할계수를 사용하여 구간별로 분배한다. α_i는 부하분할계수, h_i는 고압수용가의 계약전력, l_i는 저압수용가의 변압기용량 그리고 β_i는 이용률이다.

$$\alpha_i = h_i + l_i \times \beta_i \quad (4)$$

그림 3에서 보는바와 같이 Section1, 2, 3, 4, 5, 6은 수동개폐기나 분기점이 연결되어 있다. 따라서 자동 개폐기 SW1, 2, 3, 4로 둘러싸여있는 구역의 부하량 P_{ZL}, Q_{ZL}을 계산한다. P_i, Q_i는 I번째 개폐기의 유효전력, 무효전력을 나타낸다. P_{Zloss}, Q_{Zloss}는 구역에서 발생하는 손실을 나타낸다. r_k, x_k는 k번째 구간의 저항과 리액턴스를 나타낸다. I_i는 I번째 개폐기에서 측정된 전류를 나타낸다.

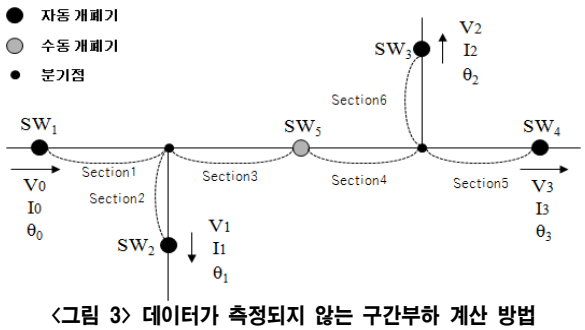
$$P_{Li} + jQ_{Li} = \alpha_i (P_{ZL} + jQ_{ZL}) \quad (5)$$

$$P_{ZL} = P_1 - \sum_{i=2}^{4} P_i - P_{Zloss} \quad (6)$$

$$Q_{ZL} = Q_1 - \sum_{i=2}^{4} Q_i - Q_{Zloss} \quad (7)$$

$$P_{Zloss} = \sum_{k=1}^{6} r_k \times \left(\left(\sum_{i=1}^{4} I_i \right) / 4 \right)^2 \quad (8)$$

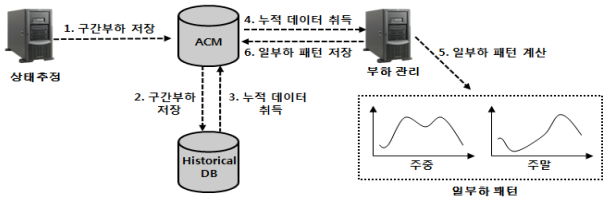
$$Q_{Zloss} = +j \sum_{k=1}^{6} x_k \times \left(\left(\sum_{i=1}^{4} I_i \right) / 4 \right)^2 \quad (9)$$



<그림 3> 데이터가 측정되지 않는 구간부하 계산 방법

2.3 부하패턴 계산 및 관리 방법

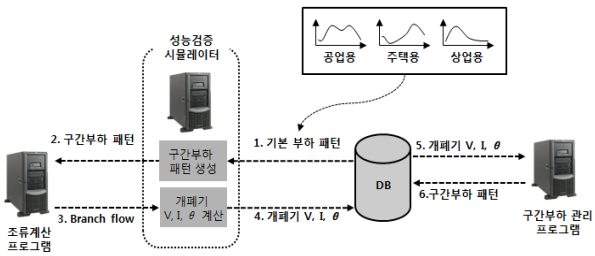
그림 4는 부하패턴 관리 체계를 나타내고 있다. 상태추정이 계산한 구간부하는 ACM(Application Common Model)이라 불리우는 데이터베이스에 저장된다. ACM에 저장되어 있는 구간부하는 히스토리컬 데이터베이스에 저장되고, 이 데이터는 계속 누적된다. 따라서 히스토리컬 데이터베이스에 저장되어 있는 일주일 동안 누적된 구간부하 데이터를 취득하여, 부하관리 어플리케이션이 주중과 주말의 부하 패턴을 계산하고, 다른 어플리케이션들이 부하 패턴을 사용 할 수 있게 ACM 데이터베이스에 저장한다.



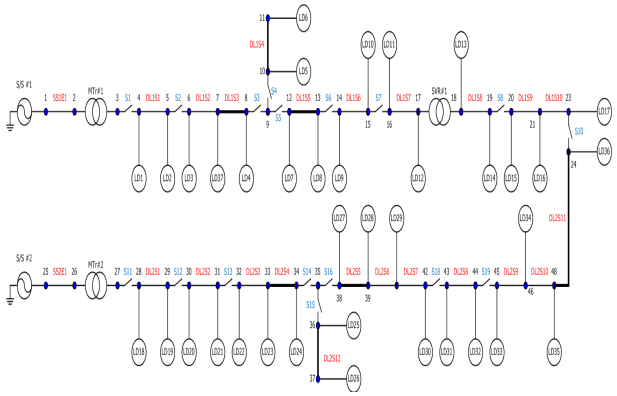
<그림 4> CIM 부하 모델

2.4 사례연구

본 논문에서 제안하고 있는 구간부하 관리 기법의 정확성을 검증하기 위해 성능검증 시뮬레이터를 개발하였으며, 실제 배전계통을 수정하여 다양한 배전계통을 대상으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용할 측정데이터는 성능검증 시뮬레이터와 조류계산 프로그램을 연동하여 생성하였다. 그림 5에서 보는바와 같이 성능 검증 시뮬레이터에서 모든 구간의 부하패턴 생성이 끝나면 조류계산 프로그램을 이용하여 모든 구간의 branch flow를 계산한다. 다음으로 branch flow 데이터를 이용하여 개폐기 V, I Θ를 계산한다. 시뮬레이터에서 계산한 개폐기 V, I Θ를 구간부하 관리 프로그램의 입력으로 사용하여 구간부하 패턴을 계산한다. 마지막으로 시뮬레이터에서 생성한 구간 부하패턴과 부하관리 프로그램에서 계산한 구간 부하패턴을 서로 비교하여 부하패턴 계산의 정확성을 검증한다. 그리고 그림 6은 시뮬레이션에 사용된 29모선 예제계통을 나타내고 있다.



<그림 5> 유효성 검증 절차



<그림 6> 28모선 예제계통

표 1은 시뮬레이터에서 생성한 부하패턴, 부하관리 프로그램에서 계산한 부하패턴 그리고 구간에서 발생한 손실을 나타내고 있으며 단위는 kva이다. 표에서 보는 것처럼 부하관리 프로그램이 계산한 값이 시뮬레이터에서 생성한 부하패턴에서 손실을 빼준 값과 같으므로 계산이 정확하게 이루어 졌음을 확인할 수 있다.

<표 1> 부하패턴 계산 결과 및 손실

시뮬레이터 생성 데이터				부하관리 계산 데이터				손실			
시간	값	시간	값	시간	값	시간	값	시간	값	시간	값
1	88.8	13	193.3	1	85.8	13	186.6	1	3	13	6.7
2	71.1	14	188.8	2	68.6	14	182.3	2	2.4	14	6.5
3	53.3	15	197.7	3	51.4	15	190.9	3	1.8	15	6.8
4	71.1	16	206.6	4	68.6	16	199.5	4	2.4	16	7.1
5	88.8	17	215.5	5	58.7	17	210.2	5	3.1	17	5.3
6	108.8	18	217.7	6	105.1	18	211.2	6	3.7	18	6.4
7	137.7	19	200	7	133	19	193.1	7	4.7	19	6.9
8	182.2	20	182.2	8	175.9	20	175.9	8	6.3	20	6.2
9	217.7	21	164.4	9	209.8	21	158.7	9	7.9	21	5.6
10	220	22	146.6	10	212.3	22	141.6	10	7.6	22	5.0
11	211.1	23	128.8	11	203.7	23	124.4	11	7.3	23	4.4
12	202.2	24	111.1	12	195.2	24	107.5	12	7.0	24	3.5

3. 결 론

본 논문에서는 부하 데이터의 신뢰도 향상을 위해 실시간 측정 데이터를 기반으로 구간 부하를 추정하는 방법을 제시하였다. 그리고 여러개의 부하패턴을 관리하여 다양한 어플리케이션이 필요로 하는 부하데이터를 제공할 수 있게 하였으며 성능검증 시뮬레이터와 조류계산 프로그램을 이용하여 구간부하 계산의 정확성을 검증하였다. 향후 배전자동화 시스템에 적용 하여 다양한 어플리케이션에 적합한 부하데이터를 제공할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[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.

[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.

[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.