

분포부하를 고려한 배전자동화 시스템 기반의 배전계통 조류계산

임일형, 최연송

명지대학교 차세대전력기술연구센터

Distribution System Load Flow Based on DAS with Considering Distributed Load

Il-Hyoung Lim, Myeon-Song Choi

Myongji-University Next-generation Power Technology Center

Abstract - 현재까지의 배전계통 조류계산은 송전계통의 조류계산 방법을 모방한 형태로써 각 구간별로 배전계통의 특성을 고려한 계산방법이었다. 이 조류계산 방법은 비선형방정식 풀이방법을 이용함으로써 구하고자 하는 전압과 위상각에 초기치를 두어 계산하는 형태로 지금까지 여러 방법들이 연구되어왔다. 하지만, 배전자동화 시스템이 도입 된 후의 배전자동화 시스템의 특징을 살린 배전계통 조류계산법의 연구는 아직까지 연구되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 배전자동화 시스템이 도입된 이후 FRTU로부터 모선의 전류와 역률각 Data를 수집할 수 있다는 특징을 가지고 이 취득 Data를 이용한 배전계통 조류계산 방법을 제안한다. 이 방법은 FRTU로부터 취득되는 전류와 역률각을 가지고 4단자 정수를 이용하여 각 모선의 전압과 위상을 계산하는 방법으로 기존 방법들보다 매우 빠르고 실질적인 배전계통 조류계산 방법이다. 또한 보다 실질적인 조류계산 방법을 제안하기 위하여 배전자동화 기반 배전계통의 여러 요소들을 고려한 배전계통 조류계산 방법을 제안한다.

현재 국내에도 배전자동화 시스템이 되기 시작한 후로 배전자동화 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서도 배전자동화 시스템에서 계통 내의 FRTU(Foward end Remote Terminal Unit)로부터 전압, 전류의 크기와 역률각을 취득할 수 있다는 특징을 가지고 4단자 정수를 이용한 배전계통 조류계산 방법을 제안한다. 부하는 기존의 집중부하로 가정해온 것과는 달리 분포부하로 고려를 하였고, DAS 기반의 배전계통 내의 control distribution equipment도 고려하였다.

1. 서 론

현재까지의 배전계통 조류계산 방법은 배전계통의 특징을 고려하여 송전계통의 조류계산 방법을 모방한 형태로 많은 연구가 진행되어왔다. 이러한 배전계통의 특징은

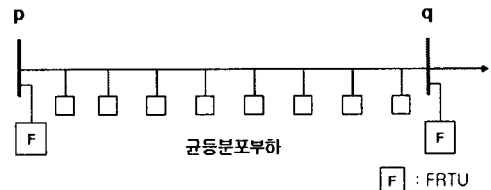
- Radial or near radial structure
- Multi-phase, unbalanced, grounded or ungrounded operation
- Dispersed generation
- Multi-phase, multi-mode control distribution equipment
- Unbalanced distributed load
- Extremely large number of branches/nodes
- High R/X ratios

들과 같이 때문에 여러 가지 조류계산 방법이 연구되어 왔다.[2][4]

대표적인 기존의 연구방법들을 살펴보면 과거 단상 조류계산만을 연구해 오다 1995년에 3상을 고려하면서 배전자동화 시스템(Distribution Automation System) 기반의 배전계통의 각종 계통의 component들을 고려한 배전계통 조류계산 방법이 연구되기 시작하였다.[2] 이 후에도 모선의 시작점에서의 전압과 선로어드미턴스를 이용한 전류식과 다음 모선의 전력을 이전 모선의 전압으로 나눈 전류식이 같아야 한다는 사실을 이용하여 NR(Newton Raphson) 방법을 써서 전압을 구하는 방법도 있었다.[1] 또한, 계통의 모든 손실을 고려하여 Feeder 전압과 분기되는 점의 전력을 기지량으로 가정하고 전압방정식과 전력방정식을 이용하여 다음 구간의 미지량을 계산하는 방법도 있었다.[3]

2. 본 론

2.1 배전계통 모델링



<그림 1> 균등분포부하 배전계통

본 논문에서는 <그림 1>의 계통에서와 같이 배전계통의 부하를 균등 분포부하로 가정을 한다. 또한 이 배전계통은 FRTU로부터 전압크기와 전류크기와 역률각의 정보가 취득된다. 하지만 Feeder로부터 멀어질수록 생기는 전압강하 때문에 전압의 정보는 신뢰할 수 없다. 따라서 FRTU로부터 신뢰하고 이용할 수 있는 정보는 전류와 역률각이다.

2.2 모선 사이의 전압과 전류

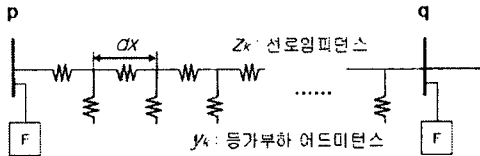
배전계통의 시작 모선은 Feeder로써 배전용 변전소 변압기 인출단이다. 따라서 변전소 내에 위치하므로 이 점에서의 FRTU로부터 취득되는 전압크기, 전류크기, 역률각은 모두 신뢰할 수 있다. 하지만 선로 중간에 위치하는 모선에서 FRTU로부터 취득되는 지점의 전압크기는 전압강하로 인한 오차 때문에 이용할 수 없다. 따라서 본 논문에서 제안한 조류계산 방법은 시작모선의 전압, 전류, 역률각은 기지량으로 가정하고, 이후의 모선들의 취득 Data는 전류와 역률각만 기지량으로 가정한다. 이 기지량들과 FRTU가 설치되어있는 구간 사이의 선로정수를 이용하여 각 모선의 전압, 전압 위상각, 전류위상각을 구할 수 있다.

또한, 배전계통 조류계산 과정에서 중요한 부분이 부하정보이다. 배전계통은 실제로 선로 중간에 설치된 많은 변압기들로부터 부하로 전력이 공급되는 불평등 분포부하이다. 그리고 일반적으로 배전계통에서는 전압에 따라 부하에서 소비하는 전력의 크기가 틀리므로 부하는

전압의 크기에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 부하모델은 분포 impedance 모델, 또는 분포된 전류 모델, 또는 이 둘의 조합으로 모델링 하였다.

본 논문에서는 배전계통 한 구간에서 <그림 1>과 같이 부하가 선로 중간에 균등하게 분포되었다고 가정하였으며, 부하에 공급되는 전력은 부하 위치의 전압에 따라 틀려진다고 보아 분포부하를 구간 내에 균등하게 분포한 등가부하 어드미턴스로 모델링 하였다.

2.3 4단자 정수를 이용한 배전계통 조류계산



<그림 2> 단위길이당 선로임피던스와 어드미턴스

<그림 2>와 같은 배전계통의 한 구간 p,q양단의 전압 전류 해석을 위해서는 분포정수 해석이 필요하다. <그림 2>에서 선로의 임의의 점 k에서 선로 단위길이당 전압강하와 부하로의 전류 유출량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dV(x) &= -K(x)zdx & (1) \\ dI(x) &= -Y(x)ydx & (2) \end{aligned}$$

여기서 zdx 는 단위길이당 선로임피던스이며, ydx 는 단위길이당 등가부하 어드미턴스이다.

분포정수 해석방법을 이용하여 미분방정식을 풀면 식 (3)(4)를 이용하여 임의의 점k에서 전압전류를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V(x) &= C_1 \cosh \gamma x + C_2 \sinh \gamma x & (3) \\ I(x) &= C_3 \sinh \gamma x + C_4 \cosh \gamma x & (4) \end{aligned}$$

여기서, $\gamma_k = \sqrt{Z_k y_k}$ 이며 선로 특성정수이다.

이 식에서 전압단의 전압전류가 주어지면 다음 모선의 전압과 전류는 전원측 모선의 전압, 전류, 선로정수, 그리고 분포부하를 나타내는 단위길이당의 등가부하 어드미턴스로 식(5)(6)과 같이 나타내어진다.

$$V_o = V_p \cosh \beta_k - Z_k I_p \sinh \beta_k \quad (5)$$

$$I_o = -\frac{V_p}{Z_k} \sinh \beta_k + I_p \cosh \beta_k \quad (6)$$

여기서, $Z_k = \sqrt{\frac{z_k}{y_k}}$ 이고 $\beta_k = \gamma_k$ 이다.

식(5)(6)에서의 모든 변수들의 값이 기지량이지만 등가부하 어드미턴스는 미지량이므로 모선의 전압 V_o 를 구할 수 없다. 이 등가부하 어드미턴스만 알 수 있다면 부하단 모선의 전압 V_o 를 구할 수 있을 것이다. 따라서 등가부하 어드미턴스 y_k 를 구하기 위해서는

- i) 부하단 모선의 전류크기는 FRTU에서 측정된 전류 크기와 같다.
- ii) 부하단 모선의 전압과 전류의 위상각 차는 FRTU로부터 취득되는 역률각과 같다.

이 두 가지 사실을 식 (3)(4)를 통해서 정리하면 식 (7)(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_o^2 = (I_p \cosh \beta_k - \frac{V_p}{Z_k} \sinh \beta_k)(I_p \cosh \beta_k - \frac{V_p}{Z_k} \sinh \beta_k)^* \quad (7)$$

$$\left[(V_p \cosh \beta_k - Z_k I_p \sinh \beta_k) \cdot (I_p \cosh \beta_k - \frac{V_p}{Z_k} \sinh \beta_k) \right]^2 =$$

$$-i_o^2 (\cos \varphi_o)^2 (V_p \cosh \beta_k - Z_k I_p \sinh \beta_k)(V_p \cosh \beta_k - Z_k I_p \sinh \beta_k)^* \quad (8)$$

여기서 i_o 는 취득된 부하단 전류의 크기, φ_o 는 취득된 역률각이다.

식(7)(8)을 NR법을 이용하여 풀면 등가부하 어드미턴스를 구할 수 있다. 여기서 구한 등가부하어드미턴스를 식(5)(6)에 대입하면 부하단 모선의 전압과 전류를 구할 수 있다. 현재 부하상태의 정보는 등가부하 어드미턴스로 나타내어지므로 식 (3)(4)는 구간의 모든 정보를 나타낸다. 이것을 4단자 정수를 이용하여 pq구간의 구간정보를 식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_q \\ I_q \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_p \\ I_p \end{pmatrix} & (9) \\ \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cosh \beta_k & -Z_k \sinh \beta_k \\ -\frac{1}{Z_k} \sinh \beta_k & \cosh \beta_k \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2.4 배전선로 말단의 경계조건

배전선로의 말단은 이후의 Switch가 Open상태 이므로 더 이상의 부하가 없으므로 전류가 0 이다. 이 사실을 이용하면 식 (9)의 전류 I_q 는 다음과 같다.

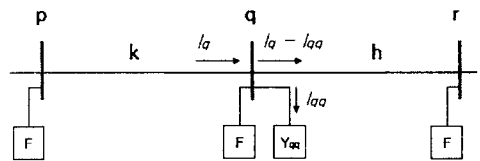
$$I_q = -\frac{V_p}{Z} \sinh \beta_k + I_p \cosh \beta_k = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 이용하면 보다 쉽게 등가부하어드미턴스를 구할 수 있으므로 배전선로 말단의 전압을 구할 수 있다.

2.5 모선의 전류 유출이 있는 구간

모선의 전류 유출이 있는 구간이란 모선 사이에 역률 조정 콘덴서 등의 계통 control distribution equipment들이 달려있다면 모선에서의 전류유출이 생기게 된다. 이러한 상황의 계통을 <그림 3>에서 나타내고 있다.

<그림 3>의 경우 q모선은 전류유출이 생기기 때문에 배전선로의 입출력 전류는 같지 않다. 여기서, 유출전류는 $I_{aq} = Y_{aq} V_q$ 와 같이 나타낼 수 있다.



<그림 3> 전류 유출이 있는 배전계통

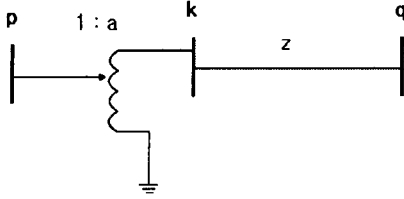
따라서, 유출전류 식을 이용하면 q모선과 r모선 사이의 선로 h구간의 전압전류 방정식과 4단자 정수는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_r \\ I_r \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_l & B_l \\ C_l & D_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_q \\ I_q - I_{aq} \end{pmatrix} & (11) \\ \begin{pmatrix} A_l & B_l \\ C_l & D_l \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cosh \beta_l + Y_{aq} Z_l \sinh \beta_l & -Z_l \sinh \beta_l \\ -\frac{1}{Z_l} \sinh \beta_l - Y_{aq} \cosh \beta_l & \cosh \beta_l \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2.6 SVR 사용 구간

고압 배전선로의 전압강하가 5%를 초과하는 선로에

대한 효율적인 전압관리를 위하여 선로전압조정장치 (Step Voltage Regulator)를 사용한다. 승압비 a 를 갖는 SVR은 조류계산에서 다음과 같이 등가회로로 나타낼 수 있다.



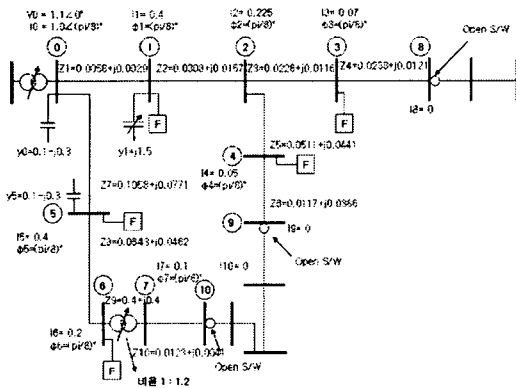
<그림 4> SVR이 포함되어있는 배전계통

여기서 z는 SVR의 임피던스이다. 변압비가 1:a일 경우 q 모선 전압은 p 모선 전압의 a배이며 q 모선 전류는 1/a 배라는 사실에서 이 구간을 4단자 정수로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\begin{pmatrix} V_q \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_p \\ I_p \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} a & -z \\ 0 & \frac{1}{a} \end{pmatrix} \quad (12)$$

3. 결 론

<그림 5>와 같은 예제 계통도를 가지고 matlab을 이용하여 조류계산을 하였다. 변압기 임피던스는 No.9의 임피던스로 가정하였고 변압비는 1:1.2 로 가정하였다. 역률각은 pi/8로 가정하였고 커패시턴스로 인한 역률 보상은 0.03만큼 이루어 졌다고 가정하였다. 또한 선로 계통의 정보는 <표 1>에 나타나있다.[5]



<그림 5 예제 계통도>

<표 1 계통의 선로 정보>

| 선로 NO | R(p.u) | X(p.u) |
|-------|--------|--------|
| 1 | 0.0058 | 0.0029 |
| 2 | 0.0308 | 0.0157 |
| 3 | 0.0228 | 0.0116 |
| 4 | 0.0238 | 0.0121 |
| 5 | 0.0511 | 0.0441 |
| 6 | 0.0117 | 0.0386 |
| 7 | 0.1068 | 0.0771 |
| 8 | 0.0643 | 0.0462 |
| 9 | 0.4000 | 0.4000 |
| 10 | 0.0123 | 0.0041 |

<그림 5>와 <표 1>의 Data로 조류계산한 결과는 <표 2>와 같다. 또한 중부하가 아닌 경부하시 시작 전류를 0.5[p.u]라고 가정하여 중부하시 부하전류의 1/2

크기로 가정하고 계산한 결과는 <표 3>과 같다.

<표 2 중부하시 예제계통 조류계산 결과>

| 구분 | V | V_θ | I | I_θ |
|----|--------|---------|--------|---------|
| 0 | 1.0000 | 0.0000 | 1.0000 | -0.5236 |
| 1 | 0.9971 | -0.0001 | 0.4000 | -0.3050 |
| 2 | 0.9749 | 0.0215 | 0.2250 | -0.2834 |
| 3 | 0.9726 | 0.0210 | 0.0750 | -0.2838 |
| 4 | 0.9699 | 0.0192 | 0.0500 | -0.2857 |
| 5 | 0.9417 | -0.0097 | 0.4000 | -0.4024 |
| 6 | 0.9186 | -0.0156 | 0.2000 | -0.4083 |
| 7 | 1.0158 | -0.0511 | 0.1667 | -0.4083 |
| 8 | 0.9716 | 0.0209 | 0.0000 | 1.5708 |
| 9 | 0.9693 | 0.0184 | 0.0000 | 0.6852 |
| 10 | 1.0147 | -0.0511 | 0.0000 | -0.4636 |

<표 3 경부하시 예제계통 조류계산 결과>

| 구분 | V | V_θ | I | I_θ |
|----|--------|---------|--------|---------|
| 0 | 1.0000 | 0.0000 | 0.5000 | -0.5236 |
| 1 | 0.9986 | -0.0001 | 0.2000 | -0.3049 |
| 2 | 0.9815 | 0.0224 | 0.1200 | -0.2825 |
| 3 | 0.9803 | 0.0221 | 0.0375 | -0.2828 |
| 4 | 0.9789 | 0.0212 | 0.0250 | -0.2837 |
| 5 | 0.9708 | -0.0048 | 0.2000 | -0.3975 |
| 6 | 0.9593 | -0.0076 | 0.1000 | -0.4003 |
| 7 | 1.1077 | -0.0239 | 0.0833 | -0.4003 |
| 8 | 0.9798 | 0.0221 | 0.0000 | -1.5708 |
| 9 | 0.9786 | 0.028 | 0.0000 | 0.6877 |
| 10 | 1.1072 | -0.0239 | 0.0000 | -0.1974 |

본 논문에서 제시한 새로운 배전계통 조류계산 알고리즘은 특별하게 배전자동화의 특징으로 나타나는 FRTU 로 부터의 취득되는 전류와 역률각을 가지고 4단자정수를 이용한 새로운 배전계통 조류계산 알고리즘을 제안하였다. 특히, 본 논문에서 제안한 조류계산 방법은 N모선 일 경우 기존의 조류계산 방법과 비교해 볼 때 Jacobian matrix의 역행렬 연산 횟수가 N^3: N^2 정도의 비율로 연산횟수가 결정되므로, 모선의 수가 많아질수록 기존의 조류계산 방법보다 훨씬 빠른 조류계산이 가능하다. 또한, 기존의 배전계통 알고리즘의 집중부하라는 가정과는 달리 분포부하로 가정하여 원하는 지점에서의 조류계산을 가능하게 하는 조류계산 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 조류계산 방법은 FRTU로부터 취득되는 전류와 역률각의 Data를 이용하였고, 배전자동화 기반의 SVR 또는 보상용 콘덴서 등의 control distribution equipment들의 영향도 고려하였기 때문에 여러 가지로 변화하는 현재 배전계통에서 보다 더 정확하고 빠른 조류계산이 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. H. Teng and C. Y. Chang, "A Novel and Fast Three-Phase Load Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, No. 4, pp. 1238-1244, Nov 2002.
- [2] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," IEEE Trans. Power Syst. vol. 10, pp. 671-679, May 1995.
- [3] H. D. Chiang and M. E. Baran, "On the Existence and Uniqueness of Load Flow Solution for Radial Distribution Power Networks", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 37, pp. 410-416, Mar 1990.
- [4] M. S. Srinivas, "Distribution load flows : A brief review", Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 942-945, Jan. 2000.
- [5] 명지대학교 차세대전력기술 연구센터, "배전자동화 최종보고서", 2004.