

피더모델링을 이용한 배전계통 재구성

김 세 호* 안 진 오* 이 수 묵**
 * 제주대학교 전기공학과 ** 한전 중앙교육원

Distribution Network Reconfiguration Using Feeder Modeling

Kim Se-Ho* An Jin-Oh* Lee Soo-Mock**
 *Cheju Univ. **KEPCO Central Educational Institute

Abstract - This paper presents two distribution-feeder models to simplify complicated distribution system calculations.

These equivalent models are developed to simulate the total series voltage drop at the end of the given feeder and the total line loss of the given feeder accurately.

In addition, the proposed models are bidirectional. This means that power infeed can be at either end and the model is accurate. Also, it is shown that the proposed models are suitable for network reconfiguration.

1. 서 론

배전계통은 많은 요소들로 구성되고 계통의 상태가 자주 변경되는 특성을 지니고 있으며 계통의 구성요소들이 많아짐에 따라 계통을 구성하는 시스템 행렬이 커지게 되어 피더 전체를 하나의 모델로 등가화시켜 표현하는 방법이 이용되고 있다. 그러나 계통의 구성이 바뀌는 경우 하나의 모델로 등가화시키는 방법은 유연성이 없어 변경시 마다 새로이 모델을 구성해야 하며 또한 피더는 단일방향인 아닌 양방향성의 특징이 있으므로 변경이전의 모델을 그대로 이용할 수가 없다.

본 연구에서는 피더의 모델링시 양방향성을 갖도록 등가화하여 계통의 구성이 변경되는 경우에도 정확하게 계통을 표현하며 등가화된 피더모델을 손실감소를 위한 재구성방안에 적용하고자 한다.

2. 피더모델링

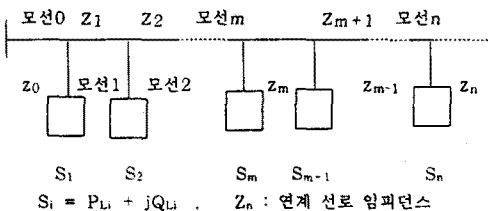


그림 1. 간단한 배전계통

Fig. 1. Simplified distribution network

간단한 배전계통을 그림 1에 표시하였다

그림 1의 배전선로 조류계산을 위한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{i+1} &= P_i - P_{Li+1} - r_i(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2 \\
 Q_{i+1} &= Q_i - Q_{Li+1} - r_i(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2 \\
 V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \\
 &\quad + (r_i^2 + x_i^2)(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

일반적으로 손실을 나타내는 식 (1)의 2차 항은 선로의 조류에 비해 적은 값이므로 2차항을 무시하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{i+1} &= P_i - P_{Li+1} = \sum_{k=i+2}^n P_{Lk} \\
 Q_{i+1} &= Q_i - Q_{Li+1} = \sum_{k=i+2}^n Q_{Lk} \\
 V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i)
 \end{aligned} \quad (2)$$

피더손실은 각 구간선로 손실의 합으로 표현되며 각 모선전압을 1[pu]로 가정하면 다음과 같다.

$$F_{loss} = \sum_{i=0}^{n-1} r_i(P_i^2 + Q_i^2) \quad (3)$$

피더 모델은 식 (2)-(3)를 이용하여 나타낼 수 있으며 전압강하에 대한 모델과 선로손실에 대한 모델로 나누어진다.

2.1 전압강하 모델

그림 1의 피더에 대한 전압강하 모델은 식 (2)를 이용하여 말단의 전압강하와 동일하도록 등가 부하와 등가 임피던스의 단일 선로로 표현하는 것으로 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta V^2 &= V_0^2 - V_n^2 \\
 &= 2 \sum_{i=0}^{n-1} (r_i P_i + x_i Q_i) \\
 &= 2 (r_{eq} P_0 + x_{eq} Q_0)
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 r_{eq} &= (r_0 + r_1 P_1 + r_2 P_2 + \dots + r_{n-1} P_{n-1}) / P_0 \\
 x_{eq} &= (x_0 + x_1 Q_1 + x_2 Q_2 + \dots + x_{n-1} Q_{n-1}) / Q_0
 \end{aligned}$$

여기서

- r_{eq} : 등가저항
- x_{eq} : 등가리액턴스
- V_i : 모선 i 의 전압
- ΔV : 모선 n 의 전압강하
- P_i, Q_i : 선로 i 의 유효전력, 무효전력
- P_0, Q_0 : 등가 부하

식 (4)의 전압강하 모델은 피더전체에 대한 모델이므로 부하절체로 인하여 계통의 구성이 바뀌는 경우 상태가 변경되는 구간개폐기의 부하측은 조류의 방향이 바뀌므로 그대로 적용할 수가 없다. 따라서 양방향성을 가진 모델을 필요로 하게 되며 그림 1에 대한 양방향성 전압강하 모델은 다음과 같다.

- 선로 z_0 로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} r_i (\sum_{j=i+1}^n P_{Lj})}{\sum_{k=1}^n P_{Lk}} \quad (5)$$

$$x_{eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i (\sum_{j=i+1}^n Q_{Lj})}{\sum_{k=1}^n Q_{Lk}}$$

- 연계선로 z_n 으로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq2} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i (\sum_{j=1}^i P_{Lj})}{\sum_{k=1}^n P_{Lk}} \quad (6)$$

$$x_{eq2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{j=1}^i Q_{Lj})}{\sum_{k=1}^n Q_{Lk}}$$

그림 1의 피더를 구성하는 모든 구간선로를 이용하여 계통의 구성을 바꿀수 있으므로 각 구간선로에 대한 양방향 전압강하 모델이 필요하다.

임의의 구간선로 z_m 에 대한 전압강하 모델은 다음과 같다.

$$r_{m\ eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} r_i (\sum_{j=i+1}^m P_{Lj})}{\sum_{k=1}^m P_{Lk}}$$

$$x_{m\ eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} x_i (\sum_{j=i+1}^m Q_{Lj})}{\sum_{k=1}^m Q_{Lk}} \quad (7)$$

$$r_{m\ eq2} = \frac{\sum_{i=m+1}^n r_i (\sum_{j=m+1}^i P_{Lj})}{\sum_{k=m+1}^n P_{Lk}}$$

$$x_{m\ eq2} = \frac{\sum_{i=m+1}^n x_i (\sum_{j=m+1}^i Q_{Lj})}{\sum_{k=m+1}^n Q_{Lk}}$$

식 (7)은 임의의 구간선로에 대한 모델식으로 모든 구간선로에 대해 전압강하 모델을 구할 수 있지만 인접한 선로사이의 관계식을 이용하면 보다 쉽게 구할 수 있으며 구간선로 r_{m-1} 의 모델 $r_{m-1\ eq}$ 를 이용한 $r_{m\ eq}$ 의 전압강하 모델은 다음과 같다.

$$r_{m\ eq} = (r_{m-1\ eq} (P_0) + r_{m-1}) P_{Lm}$$

$$+ P_{Lm} \sum_{i=0}^{m-2} r_i \} / (P_0 + P_{Lm}) \quad (8)$$

2.2 선로손실 모델

그림 1의 피더에 대한 선로손실 모델은 식 (2)-(3)을 이용하여 구간선로 손실의 합과 동일하도록 등가 부하와 등가 임피던스의 단일 선로로 표현하는 것으로 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=0}^{n-1} r_i (P_i^2 + Q_i^2) = r_{eq} (P_0^2 + Q_0^2) \quad (9)$$

$$r_{eq} = \{r_0 + r_1 (P_1^2 + Q_1^2) + r_2 (P_2^2 + Q_2^2) + \dots + r_{n-1} (P_{n-1}^2 + Q_{n-1}^2)\} / (P_0^2 + Q_0^2)$$

식 (9)의 선로손실 모델도 전압강하 모델과 마찬가지로 양방향성을 필요로 하며 양방향 모델은 다음과 같다.

- 선로 z_0 로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} r_i (\sum_{j=i+1}^n P_{Lj})^2 + (\sum_{j=i+1}^n Q_{Lj})^2}{\{(\sum_{k=1}^n P_{Lk})^2 + (\sum_{k=1}^n Q_{Lk})^2\}} \quad (10)$$

- 연계선로 z_n 으로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq2} = \frac{[\sum_{i=1}^n r_i \{(\sum_{j=1}^i P_{Lj})^2 + (\sum_{j=1}^i Q_{Lj})^2\}]}{\{(\sum_{k=1}^n P_{Lk})^2 + (\sum_{k=1}^n Q_{Lk})^2\}} \quad (11)$$

그림 1의 임의의 구간선로 z_m 에 대한 양방향 선로손실 모델은 다음과 같다.

$$r_{m\ eq1} = \frac{[\sum_{i=0}^{m-1} r_i \{(\sum_{j=i+1}^m P_{Lj})^2 + (\sum_{j=i+1}^m Q_{Lj})^2\}]}{\{(\sum_{k=1}^m P_{Lk})^2 + (\sum_{k=1}^m Q_{Lk})^2\}} \quad (12)$$

$$r_{m\ eq2} = \frac{[\sum_{i=m+1}^n r_i \{(\sum_{j=m+1}^i P_{Lj})^2 + (\sum_{j=m+1}^i Q_{Lj})^2\}]}{\{(\sum_{k=m+1}^n P_{Lk})^2 + (\sum_{k=m+1}^n Q_{Lk})^2\}}$$

선로손실 모델은 인접한 선로사이의 관계식을 이용하면 보다 쉽게 구할 수 있으며 구간선로 r_m 의 모델은 구간선로 r_{m-1} 의 모델 $r_{m-1\ eq}$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$r_{m\ eq} = \{r_{m-1\ eq} (P_0^2 + Q_0^2) + (P_{Lm}^2 + Q_{Lm}^2) \sum_{i=0}^{m-2} r_i\}$$

$$+ 2P_{Lm} \sum_{i=0}^{m-2} r_i P_i + 2Q_{Lm} \sum_{i=0}^{m-2} r_i Q_i + r_{m-1} (P_{Lm}^2 + Q_{Lm}^2) / \{ (P_0 + P_{Lm})^2 + (Q_0 + Q_{Lm})^2 \} \quad (13)$$

3. 부하절체 후의 피더 모델링

그림 1에서 선로 z_m 이 연계선로로서 피더가 모선 0으로부터 모선 m 까지의 부하를 담당하다가 부하절체로 인하여 이웃 피더가 담당하였던 모선 n 부터 모선 $m+1$ 까지의 부하를 절체받은 경우 새로운 피더 모델은 단순히 두 모델의 등가임피던스를 합하는 것으로 표현되지 않는다.

부하절체 후의 전압강하 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta V^2 = V_0^2 - V_n^2 = 2\{r_{3eq}(P_0 + P_m) + x_{3eq}(Q_0 + Q_m)\} \quad (14)$$

$$r_{3eq} = (r_{1eq}P_0 + r_{2eq}P_m + P_m \sum_{i=0}^{m-1} r_i) / (P_0 + P_m)$$

$$x_{3eq} = (x_{1eq}Q_0 + x_{2eq}Q_m + Q_m \sum_{i=0}^{m-1} x_i) / (Q_0 + Q_m)$$

여기서

ΔV : 새로운 말단 n 의 전압강하

r_{3eq} , x_{3eq} : 새로운 전압강하 모델

r_{1eq} , x_{1eq} : 모선 0으로부터 모선 m 까지의 전압강하 모델

r_{2eq} , x_{2eq} : 모선 n 으로부터 모선 $m+1$ 까지의 전압강하 모델

P_0 , Q_0 : 부하절체 이전의 등가부하

P_m , Q_m : 절체 부하

$P_0 + P_m$, $Q_0 + Q_m$: 새로운 등가부하

마찬가지로 부하절체 후의 선로손실 모델은 다음과 같다.

$$r_{3eq} = \{r_{1eq}(P_0^2 + Q_0^2) + r_{2eq}(P_m^2 + Q_m^2) + (P_m^2 + Q_m^2) \sum_{i=0}^{m-1} r_i + 2P_m \sum_{i=0}^{m-1} r_i P_i + 2Q_m \sum_{i=0}^{m-1} r_i Q_i\} / \{ (P_0 + P_m)^2 + (Q_0 + Q_m)^2 \} \quad (15)$$

여기서

r_{3eq} , x_{3eq} : 새로운 선로손실 모델

r_{1eq} , x_{1eq} : 모선 0으로부터 모선 m 까지의 선로손실 모델

r_{2eq} , x_{2eq} : 모선 n 으로부터 모선 $m+1$ 까지의 선로손실 모델

P_0 , Q_0 : 부하절체 이전의 등가부하

P_m , Q_m : 절체 부하

$P_0 + P_m$, $Q_0 + Q_m$: 새로운 등가부하

4. 피더모델을 이용한 계통재구성

피더모델을 이용한 재구성방안을 구하기 위해 그림 2에 선로손실에 대한 모델을 표시하였다.

그림 2에서 (a)는 두 개의 피더에 대한 선로손실

모델, (b)는 피더 1에 대한 양방향 모델, (c)는 피더 1의 구간부하(P_2 , Q_2)를 피더 2로 절체하였을 때의 피더 2에 대한 선로손실 모델을 표시하고 있다.

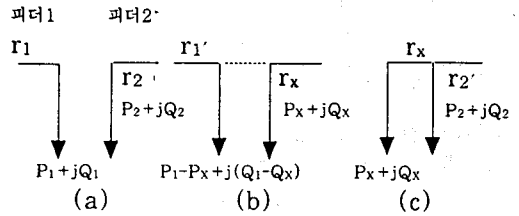


그림 2. 재구성을 위한 선로손실 모델

Fig. 2. Line-loss model for reconfiguration

재구성 이전의 손실 $Loss_1$ 과 재구성 이후의 손실 $Loss_2$ 는 다음과 같다.

$$Loss_1 = r_1(P_1^2 + Q_1^2) + r_2(P_2^2 + Q_2^2) \quad (16)$$

$$Loss_2 = r_1' \{ (P_1 - P_x)^2 + (Q_1 - Q_x)^2 \} + r_2' (P_2 + P_x)^2 + (Q_2 + Q_x)^2 + r_x (P_x^2 + Q_x^2)$$

재구성 전후의 손실차이는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta Loss = Loss_1 - Loss_2 = P_x^2 (-r_1' - r_2' - r_x) + 2P_x (P_1 r_1' - P_2 r_2') + Q_x^2 (-r_1' - r_2' - r_x) + 2Q_x (Q_1 r_1' - Q_2 r_2') + (r_1 - r_1') (P_1^2 + Q_1^2) + (r_2 - r_2') (P_2^2 + Q_2^2) \quad (17)$$

재구성 전후의 손실차이가 양수가 되면 손실감소가 일어나는 것으로서 재구성 가능한 방안이 되며 그 중에서 최대의 값이 나타나는 방안을 최종적으로 선택하면 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 양방향성을 가진 전압강하 모델과 선로손실 모델을 제안하였으며 제안한 모델이 손실 감소를 위한 재구성방안에 적용될 수가 있음을 보였다. 제안한 피더 모델은 계통의 구성이 변경되는 경우에도 정확하게 계통을 표현할 수 있어 정전작업이나 사고복구등의 부하절체시에 특히 유용하게 이용될 수 있을 것이며 대규모 복잡한 계통의 조류 계산에도 이용될 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Vempati, N. Shoultz, R.R. Chen, "Simplified feeder modeling for load flow calculations", IEEE trans. PWRD-2, (1), pp. 168-174, 1987.
- [2] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401 - 1407, April 1989.
- [3] G.B. Jasmon, L.H.C.C. Lee, "Stability of load flow techniques for distribution system voltage stability analysis", IEE Proceedings-C, Vol.138, No. 6, pp. 479 - 484, November 1991.