

## 배전계통 운용을 위한 양방향성 피더모델

김 세 호\* · 김 일 환\*

### Bidirectional-feeder Model For Distribution System Operation

Se-Ho Kim\* and Eel-Hwan Kim\*

#### 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. This feature is important for a modern distribution system in which the power infeed of the switched feeder may change from one end to the other during service restoration or feeder reconfiguration. These bidirectional feeder models are illustrated by examples. The simulation results show that it is possible to reduce complex feeders to simple equivalent models in the study of feeder-voltage profiles and losses with negligible error, even if the power infeeds of the given feeders are changed.

**Key words :** Distribution system, Voltage drop, Feeder loss, Bidirectional feeder model

#### 1. 서 론

배전계통은 구간개폐기나 연계개폐기 등의 개폐기와 선로 등의 많은 요소들로 구성되어 있어 계통의 구성상태를 나타내는 시스템 행렬이 커지게 되어 모든 구성요소를 고려하기에는 어려운 실정이다. 또한 계통에 사고가 발생하는 경우에는 사고구간을 분리하거나 사고복구를 위하여, 평상시에는 손실감소나 변압기나 선로의 부하균형을 유지하기 위해 개폐기를

조작하고 있어 계통의 구성상태가 자주 변경되는 특성을 지니고 있다<sup>1)~4)</sup>. 이와같은 개폐기의 조작을 통한 계통운용은 변경 후의 계통운전조건을 만족시키는 범위내에서만 행해지며 운전조건의 만족여부는 조류계산을 통해 확인할 수 있다. 그러나 개폐기의 조작시마다 조류계산을 수행한다는 것은 많은 시간이 요구되어 실제 운전시에는 제약이 되고 있다.

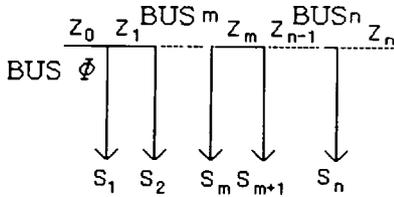
본 논문에서는 신속한 계통운용방안을 제시할 수 있도록 피더를 간단하게 모델링하고 간략화된 피더모델을 이용하여 말단전압이나 피더손실을 계산하고자 한다. 피더모델링에 관한 연구<sup>5),6)</sup>가 일부 발표되었으나 피더 전체를 모델링함으로써 개폐기 조작으로 인

\* 제주대학교 전기공학과  
Dept. of Electrical Eng., Cheju Nat'l Univ

한 계통변경에는 대응하지 못하는 단점이 있다. 본 논문의 피더모델은 전압강하 모델과 피더손실 모델로 나뉘어 지며 개폐기 조작을 통한 계통운용시에도 보다 정확하게 피더를 모델링하도록 단방향이 아닌 양방향성을 지닌 모델링 방안을 제시한다.

## II. 피더모델링

피더를 모델링하기 위하여 간단한 배전계통을 Fig. 1에 표시하였다.



$$S_i = P_{Li} + jQ_{Li}, Z_n: \text{Impedance of the line}$$

Fig. 1 Simplified distribution network

Fig. 1의 배전선로 조류계산을 위한 식은 다음과 같다.

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

배전선로의 조류는 식 (1)을 이용하여 변전소 인출 모선인 모선 0과 말단모선인 모선 n 사이를 수렴이 될 때까지 반복적으로 선로와 모선을 추적함으로써 구하게 된다.

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

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

구간선로 i의 손실은 각 모선전압을 1[pu]로 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Loss } i &= r_i(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2 \\ &= r_i(P_i^2 + Q_i^2) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 피더손실은 각 구간선로 손실의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$F_{\text{loss}} = \sum_{i=0}^{n-1} r_i(P_i^2 + Q_i^2) \quad (4)$$

피더 모델은 식 (2)-(4)를 이용하여 나타낼 수 있으며 전압강하에 대한 모델과 선로손실에 대한 모델로 나누어진다.

### 2.1. 전압강하 모델

Fig. 1의 피더에 대한 전압강하 모델은 식 (2)를 이용하여 말단의 전압강하와 동일하도록 하나의 등가 부하와 등가 임피던스의 단일 선로로 표현하는 것으로 식(5)와 Fig. 2로 표현할 수 있다.

$$V_n^2 = V_0^2 - 2 \sum_{i=0}^{n-1} (r_i P_i + x_i Q_i) \quad (5)$$

$$= 1.0 - 2(r_{eq} P_0 + x_{eq} Q_0)$$

$$r_{eq} = (r_0 P_0 + r_1 P_1 + r_2 P_2 + \dots + r_{n-1} P_{n-1})/P_0$$

$$x_{eq} = (x_0 Q_0 + x_1 Q_1 + x_2 Q_2 + \dots + x_{n-1} Q_{n-1})/Q_0$$

$$P_0 = \sum_{i=1}^{n-1} P_i, \quad Q_0 = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i$$

여기서,

$r_{eq}$  : 등가저항

$x_{eq}$  : 등가리액턴스

$V_n$  : 모선 n의 전압

$P_i, Q_i$  : 선로 i의 유효전력, 무효전력

$P_0, Q_0$  : 등가 부하

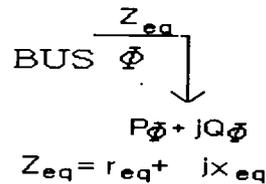


Fig. 2 Voltage-drop model

식 (5)의 전압강하 모델은 피더전체에 대한 모델이므로 계통운용중 부하절체로 인하여 계통의 구성이 바뀌는 경우 상태가 변경되는 구간개폐기의 부하측은 조류의 방향이 바뀌므로 그대로 적용할 수 없다. 따라서 양방향성을 가진 모델을 필요로 하게 되며 Fig. 1에 대한 양방향성 전압강하 모델은 다음과 같다.

- 선로  $z_0$ 로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} r_i (\sum_{j=i+1}^n P_{Lj})}{\sum_{k=1}^n P_{Lk}} \quad (6)$$

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

- 연계선로  $z_n$ 으로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq2} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i (\sum_{j=1}^i P_{Lj})}{\sum_{k=1}^n P_{Lk}} \quad (7)$$

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

Fig. 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.

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

$$x_{m\ eq1} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} x_i (\sum_{j=i+1}^m Q_{Lj})}{\sum_{k=1}^m Q_{Lk}} \quad (8)$$

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

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

식 (8)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.

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

$$(P_0 + P_{Lm}) \quad (9)$$

## 2.2 선로손실 모델

Fig. 1의 피더에 대한 선로손실 모델은 식 (2)-(4)를 이용하여 구간선로 손실의 합과 동일하도록 등가 부하와 등가 임피던스의 단일 선로로 표현하는 것으로 식 (10)과 Fig. 3으로 표현된다.

$$\sum_{i=0}^{n-1} r_i (P_i^2 + Q_i^2) = r_{eq} (P_0^2 + Q_0^2) \quad (10)$$

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

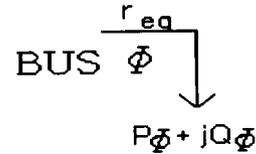


Fig. 3 Line-loss model

식 (10)의 선로손실 모델도 전압강하 모델과 마찬가지로 양방향성을 필요로 하며 양방향 모델은 다음과 같다.

- 선로  $z_0$ 로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq1} = ( \sum_{i=0}^{n-1} r_i ( (\sum_{j=i+1}^n P_{Lj})^2 + (\sum_{j=i+1}^n Q_{Lj})^2 ) ) / ( (\sum_{k=1}^n P_{Lk})^2 + (\sum_{k=1}^n Q_{Lk})^2 ) \quad (11)$$

- 연계선로  $z_n$  으로부터 전력을 공급받는 경우

$$r_{eq2} = ( \sum_{i=1}^n r_i ( (\sum_{j=1}^i P_{Lj})^2 + (\sum_{j=1}^i Q_{Lj})^2 ) ) / ( (\sum_{k=1}^n P_{Lk})^2 + (\sum_{k=1}^n Q_{Lk})^2 ) \quad (12)$$

임의의 구간선로  $z_m$ 에 대한 양방향 선로손실 모델은 다음과 같다.

$$r_{m\ eq1} = ( \sum_{i=0}^{m-1} r_i ( (\sum_{j=i+1}^m P_{Lj})^2 + (\sum_{j=i+1}^m Q_{Lj})^2 ) ) /$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \left( \sum_{k=1}^m P_{Lk} \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^m Q_{Lk} \right)^2 \right\} \\
 r_{m \text{ eq}2} = & \left[ \left( \sum_{i=m+1}^n r_i \left\{ \left( \sum_{j=m+1}^i P_{Lj} \right)^2 + \left( \sum_{j=m+1}^i Q_{Lj} \right)^2 \right\} \right) \right. \\
 & \left. \left\{ \left( \sum_{k=m+1}^n P_{Lk} \right)^2 + \left( \sum_{k=m+1}^n Q_{Lk} \right)^2 \right\} \right] /
 \end{aligned} \tag{13}$$

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

$$\begin{aligned}
 r_{m \text{ eq}} = & \left\{ r_{m-1 \text{ eq}} (P_0^2 + Q_0^2) + (P_{Lm}^2 + Q_{Lm}^2) \sum_{i=0}^{m-2} r_i \right. \\
 & + 2P_{Lm} \sum_{i=0}^{m-2} r_i P_i + 2Q_{Lm} \sum_{i=0}^{m-2} r_i Q_i + r_{m-1} (P_{Lm}^2 + \\
 & \left. Q_{Lm}^2) \right\} / \left\{ (P_0 + P_{Lm})^2 + (Q_0 + Q_{Lm})^2 \right\} \tag{14}
 \end{aligned}$$

### III. 개폐기 조작후의 피더모델

사고복구나 계통 재구성 등 개폐기 조작으로 인하여 계통의 구성이 변경된 경우에도 개폐기 조작으로 인하여 변경된 피더에 대한 새로운 모델이 구성되어야 하며 이 경우 개폐기 조작이전에 구한 등가저항등을 단순히 가감하는 것으로는 정확하게 조작 후의 피더 모델을 표현할 수 없다.

Fig. 1에서 선로  $z_m$ 이 연계선로로서 피더가 모선 0으로부터 모선  $m$ 까지의 부하를 담당하다가 개폐기 조작으로 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.

개폐기 조작 후의 전압강하 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \Delta V^2 = & V_0^2 - V_n^2 = 2 \left\{ r_3 \text{ eq} (P_0 + P_m) + \right. \\
 & \left. X_3 \text{ eq} (Q_0 + Q_m) \right\} \\
 r_3 \text{ eq} = & (r_1 \text{ eq} P_0 + r_2 \text{ eq} P_m + P_m \sum_{i=0}^{m-1} r_i) \\
 & / (P_0 + P_m) \tag{15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_3 \text{ eq} = & (X_1 \text{ eq} Q_0 + X_2 \text{ eq} Q_m + Q_m \sum_{i=0}^{m-1} X_i) \\
 & / (Q_0 + Q_m)
 \end{aligned}$$

$\Delta V$  : 새로운 말단  $n$ 의 전압강하

$V_0$  : 변전소 인출모선전압( = 1.0 p.u.)

$V_n$  : 말단 모선전압

$r_3 \text{ eq}, X_3 \text{ eq}$  : 새로운 전압강하 모델

$r_1 \text{ eq}, X_1 \text{ eq}$  : 모선 0으로부터 모선  $m$ 까지의 전압강하 모델

$r_2 \text{ eq}, X_2 \text{ eq}$  : 모선  $n$ 으로부터 모선  $m+1$ 까지의 전압강하 모델

$P_0, Q_0$  : 개폐기 조작 이전의 등가부하

$P_m, Q_m$  : 절체되는 부하

$P_0 + P_m, Q_0 + Q_m$  : 새로운 등가부하

마찬가지로 개폐기 조작 후의 선로손실 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 r_3 \text{ eq} = & (r_1 \text{ eq} (P_0^2 + Q_0^2) + r_2 \text{ eq} (P_m^2 + Q_m^2) + \\
 & (P_m^2 + Q_m^2) \sum_{i=0}^{m-1} r_i + 2P_m \sum_{i=0}^{m-1} r_i P_i + 2Q_m \sum_{i=0}^{m-1} r_i Q_i) \\
 & / \left\{ (P_0 + P_m)^2 + (Q_0 + Q_m)^2 \right\} \tag{16}
 \end{aligned}$$

여기서,

$r_3 \text{ eq}, X_3 \text{ eq}$  : 새로운 선로손실 모델

$r_1 \text{ eq}, X_1 \text{ eq}$  : 모선 0으로부터 모선  $m$ 까지의 선로손실 모델

$r_2 \text{ eq}, X_2 \text{ eq}$  : 모선  $n$ 으로부터 모선  $m+1$ 까지의 선로손실 모델

$P_0, Q_0$  : 개폐기 조작 이전의 등가부하

$P_m, Q_m$  : 절체되는 부하

$P_0 + P_m, Q_0 + Q_m$  : 새로운 등가부하

### IV. 결과 및 고찰

피더모델에 대한 적합성을 테스트하기 위한 모델계통을 Fig. 4에, 모델계통의 선로와 모선정보를 Table 1에 표시하였다. Fig. 4의 모델계통에 대해 기준용량 1,000kVA, 기준전압 22.9kV로 조류계산을 수행하였으며 또한 전압강하 모델과 선로손실 모델을 구성하여

말단전압과 피더손실을 계산하여 Table 2에 수록하였다.

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 간략화된 피더

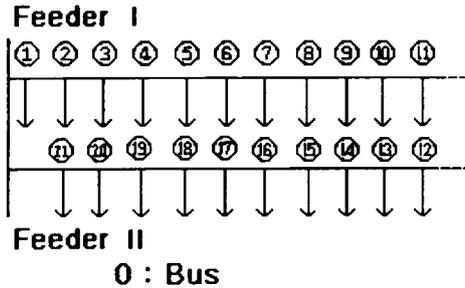


Fig. 4 Model system

Table 1 Information of line and bus

from bus	to bus	R[Ω]	X[Ω]	Load ( to bus) P <sub>L</sub> [kW] Q <sub>L</sub> [kVar]	
1	2	0.4930	0.2511	200	140
2	3	0.3660	0.1864	220	180
3	4	0.3811	0.1941	160	130
4	5	0.8190	0.7070	160	120
5	6	0.1872	0.6188	300	200
6	7	0.7114	0.2351	300	200
7	8	1.0300	0.7400	160	120
8	9	1.0440	0.7400	160	120
9	10	0.1966	0.0650	150	130
10	11	0.4512	0.3083	190	160
11	12	0.3410	0.5302		
1	21	0.1640	0.1565	240	130
21	20	1.5042	1.3554	300	150
20	19	0.4095	0.4784	190	90
19	18	0.7089	0.9373	180	90
18	17	0.4512	0.3083	160	80
17	16	0.8980	0.7091	210	100
16	15	0.8960	0.7011	150	70
15	14	0.2030	0.1034	200	100
14	13	0.2842	0.1447	190	90
13	12	0.3105	0.3619	190	100

모델을 이용한 말단전압과 피더손실의 계산치가 조류 계산에 의한 계산치와 큰 차이가 나지 않아 본 논문에서 제시한 피더의 모델이 타당함을 알 수 있다.

또한 사고복구나 계통재구성 등 개폐기 조작이 이루어지는 경우에 대한 피더모델을 구성하여 Table 3에 수록하였다. Table 3에서 전압강하 모델을 이용한 말단전압은 오차가 상당히 적음을 알 수 있으며 피더 손실에 대한 오차는 말단전압에 비하여 오차가 크게 난다. 이는 선로손실에 대한 피더모델을 구성할 때에 각 구간손실을 무시하여 모델링 함으로써 생기는 결과이며 또한 Fig. 4의 모델계통은 일반적인 계통에

Table 2 Result for model system

(% error)

		load flow	feeder model
end voltage	V <sub>11</sub> [p.u.]	0.9830	0.9831(0.01%)
	V <sub>12</sub> [p.u.]	0.9810	0.9811(0.01%)
feeder	Feeder I [p.u.]	0.02287	0.02227(2.62%)
loss	Feeder II [p.u.]	0.02256	0.02185(3.25%)

Table 3 Result for breaker operation

(% error)

branch ex. (11 - 12)	end voltage[pu]		feeder loss[pu]	
	load flow	feeder model	load flow	feeder model
7 - 8	0.9654	0.9659 (0.05%)	0.05761	0.05480 (4.87%)
8 - 9	0.9696	0.9699 (0.03%)	0.04729	0.04533 (4.14%)
9 - 10	0.9733	0.9735 (0.02%)	0.03830	0.03699 (3.42%)
10 - 11	0.9768	0.9770 (0.02%)	0.03064	0.02979 (2.77%)
16 - 15	0.9703	0.9712 (0.09%)	0.05404	0.05150 (4.70%)
15 - 14	0.9731	0.9738 (0.07%)	0.04616	0.04418 (4.29%)
14 - 13	0.9768	0.9772 (0.04%)	0.03675	0.03542 (3.62%)
13 - 12	0.9799	0.9801 (0.02%)	0.02948	0.02856 (3.12%)

비해  $R/X$ 가 큰 나쁜 조건(ill-condition)을 나타내는 계통이므로 피더손실 모델을 이용한 결과는 오차가 크게 된다. 모델계통에 비해  $R/X$ 가 작은 일반적인 계통에 대해서는 본 논문에서 제안한 피더 모델로 피더손실을 추정하여도 오차가 크지 않게 된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 양방향성을 가진 전압강하 모델과 선로손실 모델을 제안하였으며 제안한 피더모델을 모델계통에 적용시켜 본 결과 실제 계통에 적용시에도 큰 오차없이 적용이 가능함을 보였다. 제안한 피더 모델은 사고복구나 계통재구성 등 개폐기 조작을 통하여 계통의 구성이 변경되는 경우에도 계통을 표현할 수 있어 정전작업이나 사고복구등의 부하절체시에 특히 유용하게 이용될 수 있을 것이며 대규모 복잡한 계통의 조류계산에도 이용될 수 있다.

## 참고문헌

1) D. Shirmohammadi, H. W. Hong, 1988. "A compensation-based power flow method for

weekly meshed distribution and transmission networks". IEEE Trans. Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753 - 762.

2) Tim Taylor, David Lubkeman, 1990. "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration". IEEE Trans. Power DELivery, Vol. 5, No. 1, pp. 239 - 246.

3) Dariush Shirmohammadi, H. Wayne Hong, 1989. "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line loss reduction". IEEE Trans. Power DELivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1492 - 1498.

4) Mesut E. Baran, Felix F. Wu, 1989. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing". IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401 - 1407.

(5) Vempati, N. Shoults, R.R. Chen, 1987. "Simplified feeder modeling for load flow calculations". IEEE trans. PWRS-2, (1), pp. 168-174.

6) T.H. Chen, B.W. Wany, 1995. "Simplified bidirectional-feeder models for distribution-system calculation". IEE Proc-Gener. Transm., Distrib., Vol. 142, No. 5, pp. 459-467