

배전시스템의 모형

황 갑 주

(울산대 공대 전기공학과 부교수)

1. 서 언

시스템공학과 컴퓨터 관련분야의 비약적인 발전은 전력계통분야에도 기술의 혁신을 가져와 최근에는 종합자동화시스템의 구현에 까지 발돋움하고 있다. 일면 그동안 송전계통의 운용이나 해석분야에는 상당한 발전을 이룩한 반면, 배전계통의 경우 제어·해석에 관련한 기술보다도 새로운 통신기술에 의한 원격계측이나 감시 등 운용측면의 자동화가 우선되어 왔다.

우리나라의 산업화는 이미 선진국 수준에 가까와 전력공급의 신뢰도 요구수준도 극히 높다. 이 신뢰도 향상에 큰 비중을 차지하는 부문이 또한 배전계통이다. 최근의 배전분야에서 나타나는 기술적인 변화를 살펴보면 선로의 지중화, 신 배전방식의 채용, 마이크로프로세서에 의한 계통보호, 수용가 중심화 추세에 따라 배전선로에 열병합 발전기가 연계되는 등 새로운 기술적 이해가 필요하고 있다.

이러한 배전계통에서 제반설비의 특성을 검토하고, 이론을 재정립하며 실용가능한 모형을 개발한다는 것은 배전기술의 구축을 위한 초석이라고 볼 수 있다. 그런데 배전계통의 기술에는 송전계통과 달라 불평형을 감안해야하므로 3상으로 다루어야 한다. 또한 여러가지 접지방식이 있으며, 전압레벨, 변압기의 결선도 다양하다. 배전계통은 전압이 낮고 부하전류가 크기 때문에 조류계산이나 고장해석시 부하의 특성을 고려하지 않으면 큰오차가 생길 수 있

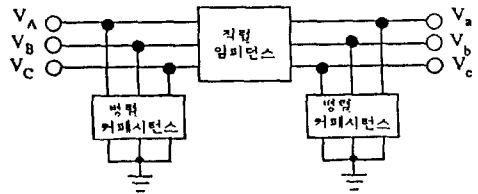


그림 1. 선로도체의 모형

다.

본 고에서는 배전계통의 선로, 전력용 콘덴서, 변압기, 부하 등 기본이 되는 설비를 대상으로 상좌표계의 모형을 체계적으로 소개하도록 한다.

2. 선로도체

1차선로의 피더와 2차선로의 케이블은 그림 1과 같이 일반적인 π 등가화 모형으로 표현할 수 있다. 2차선로는 전압이 낮기 때문에 케이블과 대지간 병렬 커패시턴스를 무시해도 큰 오차가 발생하지 않는다.

2.1 직렬 임피던스

그림 2는 3상 배전선로에서 각 상과 중성선의 직렬 임피던스를 나타낸 것인데, 이 회로에다 Kron의 축약기법을 도입하면 그림 3과 같은 등가모형이 구해진다. 이 표현에도 중성선 또는 접지선의 영향이 고려되어 있음을 알 수 있다. 그림 3은 선로의 직렬

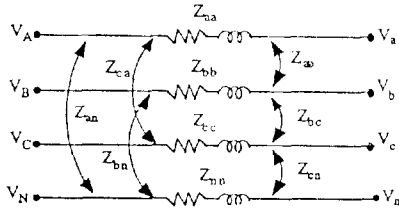


그림 2. 원래의 3상선로 도체

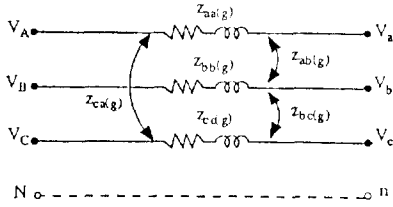


그림 3. 3상도체의 직렬임피던스분

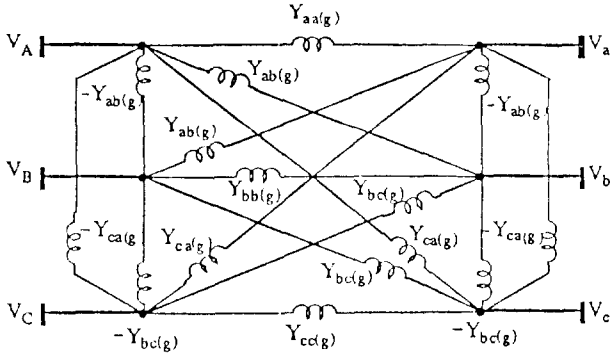


그림 4. 3상도체에서 직렬어드미턴스분의 등가회로 임피던스성분을 나타냈으며, 그 직렬 어드미턴스행렬은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$[Y^{abc}] = \begin{bmatrix} Y_{aa(g)} & Y_{ab(g)} & Y_{ac(g)} \\ Y_{ba(g)} & Y_{bb(g)} & Y_{bc(g)} \\ Y_{ca(g)} & Y_{cb(g)} & Y_{cc(g)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

선로도체에서 직렬성분을 각 상에 대하여 등가회로를 표현하면 그림 4와같이 된다.

2.2 병렬 커패시턴스

원래 3상선로에서 나타나는 병렬 커패시턴스분을 나타내면 그림 5(a)와 같다. 이것을 배전해석의 용이성을 위하여 등가주입전류로 표현하면 그림 5(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 각상의 주입전류 I_a , I_b 및 I_c 는

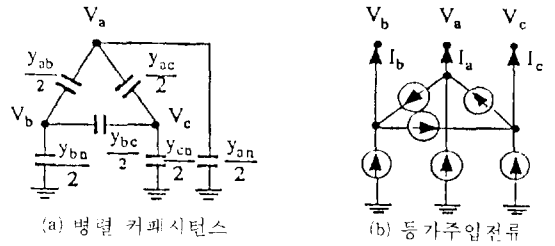


그림 5. 3상도체의 병렬 커패시턴스와 등가주입전류

$$\begin{aligned} I_a &= -\frac{1}{2}(y_{ab}+y_{ac}+y_{an})V_a + \frac{y_{ab}}{2}V_b + \frac{y_{ac}}{2}V_c \\ I_b &= -\frac{1}{2}(y_{ab}+y_{bc}+y_{bn})V_b + \frac{y_{ab}}{2}V_a + \frac{y_{bc}}{2}V_c \\ I_c &= -\frac{1}{2}(y_{ac}+y_{bc}+y_{cn})V_c + \frac{y_{ac}}{2}V_a + \frac{y_{bc}}{2}V_b \end{aligned} \quad (2)$$

3. 전력용 커패시터

그림 6(a)와 같은 3상 전력용 커패시터를 그림 6(b)와 같이 등가주입전류로 나타낼 수 있다. 커패시터의 정전용량은 전압에 따라 변하므로 해석과정에서 전압 특성을 고려해야 한다. 즉,

$$Q_a = Q_a^0 \left| \frac{V_a}{V_a^0} \right|^2 ; Q_b = Q_b^0 \left| \frac{V_b}{V_b^0} \right|^2 ; Q_c = Q_c^0 \left| \frac{V_c}{V_c^0} \right|^2 \quad (3)$$

만약 $|V| \neq 0$ 이라면

$$I_a = \frac{-jQ_a}{V_a^*} ; I_b = \frac{-jQ_b}{V_b^*} ; I_c = \frac{-jQ_c}{V_c^*} \quad (4)$$

또는 $|V|=0$ 이라면

$$I_a = I_b = I_c = 0 \quad (5)$$

4. 변압기

배전계통 해석을 위한 변압기의 모형에는 기본적으로 두가지 요소를 감안해야 한다. 즉 그림 7에 보

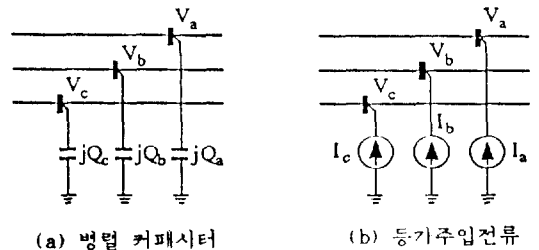


그림 6. 3상 병렬 커패시터와 등가주입전류

인바와 같이 누설 어드미턴스 Y_T 와 변압기 2차측전압의 함수로 나타낼 수 있는 변압기의 철손을 들 수 있다. 변압기 철손의 표현에는 용량을 기준으로 하여:

$$P(\text{pu}) = \frac{\text{KVA 정격}}{\text{시스템 기준}} (A|V|^2 + B_e^{C|V|}) \quad (6)$$

$$Q(\text{pu}) = \frac{\text{KVA 정격}}{\text{시스템 기준}} (D|V|^2 + E_e^{F|V|})$$

식 (6)에서 계수들의 대표적인 값으로는 실험적으로
 $A=0.00267$ $B=0.739 \times 10^{-9}$ $C=13.5$
 $D=0.00167$ $E=0.268 \times 10^{-13}$ $F=22.7$
 이 제시되어 있다. [3]

변압기는 구조상으로 단상변압기 3대를 사용하는 경우와 1대의 3권선 변압기를 사용하는 경우로 나누어진다. 배전해석시에는 통상 모형의 복잡성을 피하기 위하여 동일한 변압기 3대를 결선하여 사용하는 것으로 가정한다. 이러한 가정하에 가능한 변압기의 결선에는 9가지가 있을 수 있다. 각 변압기 결선에서 3상 변압기의 어드미턴스행렬을 구성하는 특성 부행렬을 나타내면 표 1과 같이 된다.

단,

$$Y_I = \begin{bmatrix} y^t & 0 & 0 \\ 0 & y^t & 0 \\ 0 & 0 & y^t \end{bmatrix} \quad Y_{II} = \begin{bmatrix} 2y^t & -y^t & -y^t \\ -y^t & 2y^t & -y^t \\ -y^t & -y^t & 2y^t \end{bmatrix}$$

$$Y_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -y^t & y^t & 0 \\ 0 & -y^t & y^t \\ -y^t & 0 & -y^t \end{bmatrix} \quad (7)$$

표 1. 3상 변압기의 어드미턴스행렬을 구성하는 특성 부행렬

변압기 결선		자기 어드미턴스		상호 어드미턴스	
종류	P-S	Y_p^{abc}	Y_s^{abc}	Y_{ps}^{abc}	Y_{sp}^{abc}
1	$Y_G - Y_G$	Y_I	Y_I	$-Y_I$	$-Y_I$
2	$Y_G - Y$	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
3	$Y_G - \Delta$	Y_I	Y_{II}	$-Y_{III}$	Y^t_{III}
4	$Y - Y_G$	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
5	$Y - Y$	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
6	$Y - \Delta$	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{III}$	Y^t_{III}
7	$\Delta - Y_G$	Y_{II}	Y_I	$-Y^t_{III}$	Y_{III}
8	$\Delta - Y$	Y_{II}	Y_{II}	$-Y^t_{III}$	Y_{III}
9	$\Delta - \Delta$	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y^t_{II}$

단, y^t 는 상(相)당 누설 어드미턴스[pu]이다.

만약 1, 2차 권선간에 변압비 $\alpha : \beta$ [pu]가 존재할 경우 변압비를 고려하여 다음과 같이 특성부행렬을 수정하면 된다.

- (1) 1차측의 어드미턴스 행렬을 α^2 로 나눈다.
- (2) 2차측의 어드미턴스 행렬을 β^2 로 나눈다.
- (3) 1, 2차 상호어드미턴스 행렬은 $\alpha \cdot \beta$ 로 나눈다.

이제 가능한 3상 변압기 결선중에서 널리 사용되는 Δ - Y_G 에 대한 모형을 좀 더 살펴보자. 그림 8은 3상 Δ - Y_G 변압기의 결선도이다.

이 3상 Δ - Y_G 결선 변압기의 어드미턴스행렬은

$$Y_T^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{III} \\ Y_{III} & Y_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}y_t & -\frac{1}{3}y_t & -\frac{1}{3}y_t & \frac{-y_t}{\sqrt{3}} & \frac{y_t}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{3}y_t & \frac{2}{3}y_t & -\frac{1}{3}y_t & 0 & \frac{-y_t}{\sqrt{3}} & \frac{y_t}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{3}y_t & -\frac{1}{3}y_t & \frac{2}{3}y_t & \frac{y_t}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{-y_t}{\sqrt{3}} \\ \frac{-y_t}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{y_t}{\sqrt{3}} & y_t & 0 & 0 \\ \frac{y_t}{\sqrt{3}} & \frac{-y_t}{\sqrt{3}} & 0 & 0 & y_t & 0 \\ 0 & \frac{y_t}{\sqrt{3}} & \frac{-y_t}{\sqrt{3}} & 0 & 0 & y_t \end{bmatrix} \quad (8)$$

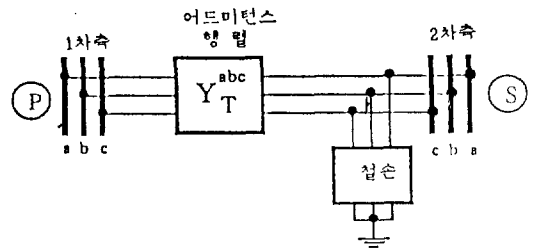


그림 7. 변압기 모형의 구성

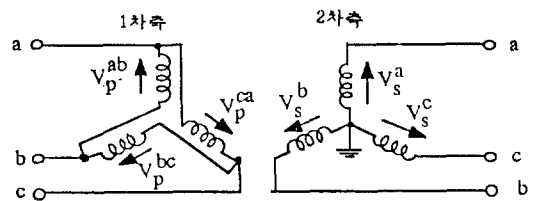


그림 8. 3상 Δ - Y_G 변압기의 결선도

결선 변압기에 탭이 있을 경우 식 (8)은 다음과 같이 수정된다.

$$Y_T^{abc} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & -\frac{1}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & -\frac{1}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & \frac{-y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & 0 & \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} \\ -\frac{1}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & \frac{2}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & -\frac{1}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & \frac{-y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & 0 \\ -\frac{1}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & -\frac{1}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & \frac{2}{3} \frac{y_t}{\alpha^2} & 0 & \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & \frac{-y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} \\ \frac{-y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & 0 & \frac{y_t}{\beta^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & 0 & \frac{y_t}{\beta^2} & 0 \\ \frac{y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & 0 & \frac{-y_t}{\sqrt{3} \alpha \beta} & 0 & 0 & \frac{y_t}{\beta^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)의 등가회로를 그려보면

등가회로에서

$$Y_1 = \frac{y_t}{\beta^2} \quad Y_2 = \frac{y_t}{3\alpha^2} \quad Y_3 = \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta} \quad (10)$$

그림 9의 3상 Δ - Y_C 변압기의 등가회로에서 3개의 Y_1 요소가 접지되어 있음을 볼 수 있다. 이들 요소는 해석산법의 여하에 따라 주입전류로 표현할 필요가 있다. 이들 3개의 접지요소를 주입전류로 모형화

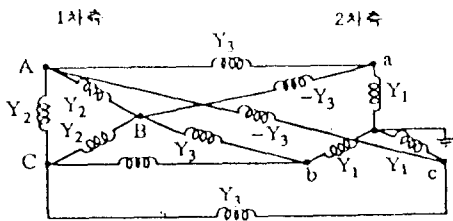


그림 9. 3상 Δ - Y_C 변압기의 등가회로

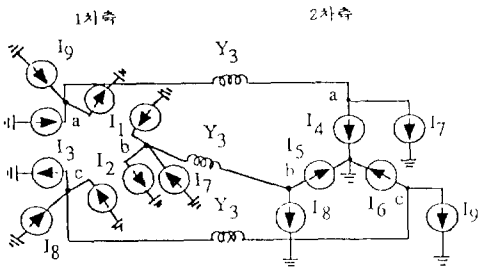


그림 10. 3상 Δ - Y_C 변압기의 수정모형

하면 Y_C 측이 기준모선일때, 시스템 어드미턴스 행렬 Y_{BUS} 는 특이(singular)가 되어버린다. 이것을 방지하기 위하여 3개의 (Y_3)와 3개의 (Y_2)를 주입전류로 바꾸는 방법이 있다. 이 방법의 장점은 시스템 임피던스나 어드미턴스 행렬을 구성할 때 변압기 1,2차측 같은상에 대한 등가선로분만 고려하면 되고, 다른 선로는 등가주입전류로 표현되어 수치계산시 반영된다. 그림 10은 이와같이 수정한 모형을 나타낸 것이다.

그림 10의 모형에서

그림 10을 이해가 쉽도록 다시 그려보면 그림 11과 같이 된다.

$$Y_3 = \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}$$

$$I_1 = \frac{y_t}{3\alpha^2} (V_p^a - V_p^b) \quad I_2 = \frac{y_t}{3\alpha^2} (V_p^b - V_p^c)$$

$$I_3 = \frac{y_t}{3\alpha^2} (V_p^c - V_p^a)$$

$$I_4 = \frac{y_t}{\beta^2} V_s^a \quad I_5 = \frac{-y_t}{\beta^2} V_s^b$$

$$I_6 = \frac{y_t}{\beta^2} V_s^c$$

$$I_7 = -\frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta} (V_p^b - V_s^a) \quad I_8 = -\frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta} (V_p^c - V_s^b)$$

$$I_9 = -\frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta} (V_p^a - V_s^c)$$

그림 10을 이해가 쉽도록 다시 그려보면 그림 11과 같이 된다.

그림 11의 변형모형에서

$$Y_3 = \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}$$

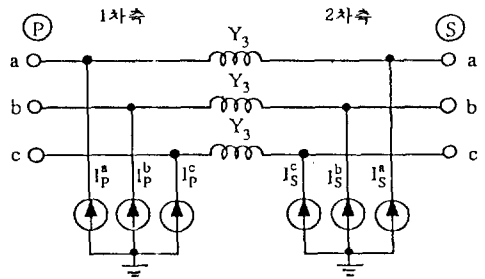


그림 11. 3상 Δ - Y_C 변압기의 변형모형

$$I_p^a = \frac{y_t}{3\alpha^2}(V_p^c - V_p^b) - \frac{y_t}{3\alpha^2}(V_p^b - V_p^a) - \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}(V_p^a - V_s^c)$$

$$I_p^b = \frac{y_t}{3\alpha^2}(V_p^a - V_p^b) - \frac{y_t}{3\alpha^2}(V_p^b - V_p^c) - \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}(V_p^b - V_s^a)$$

$$I_p^c = \frac{y_t}{3\alpha^2}(V_p^b - V_p^c) - \frac{y_t}{3\alpha^2}(V_p^c - V_p^a) - \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}(V_p^c - V_s^b)$$

$$I_s^a = -\left\{ \frac{y_t}{\beta^2}V_s^a - \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}(V_p^b - V_s^a) \right\}$$

$$I_s^b = -\left\{ \frac{y_t}{\beta^2}V_s^b - \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}(V_p^c - V_s^b) \right\}$$

$$I_s^c = -\left\{ \frac{y_t}{\beta^2}V_s^c - \frac{y_t}{\sqrt{3}\alpha\beta}(V_p^a - V_s^c) \right\}$$

5. 부 하

그림 12는 대표적인 3상 부하를 나타낸 것으로 부하의 불평형이 고려된다.

부하특성의 정확한 모형은 전력계통의 특성과 현상을 이해하는데 매우 중요하다. 특히 배전계통은 송전계통과 달리 전압이 낮으며 부하전류가 크기 때문에 적절한 부하의 모형을 고려하지 않을 경우 조류계산이나 고장해석시 큰 오차가 생기게 된다. 그

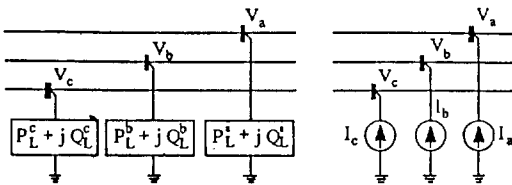


그림 12. 3상부하와 등가주입전류

러나 전력부하는 지역에 따라 그 특성이 다를 뿐만 아니라 계통의 상황이나 부하구성이 시시각각으로 변하는 특성을 가지고 있어 올바른 모형을 구성하는 것이 매우 복잡하다.

부하의 모형에는 여러가지 방법이 있으며[5,6] 나름대로의 장단점을 내포하고 있다. 배전계통 해석등에 널리 쓰이고 있는 모형으로는 부하 윈도우(load window)를 이용하여 복합모형으로 고려하는 방법을 들 수 있다. 이것은 개별 부하설비의 특성을 파악해 둔 다음, 해당 모선에 연결된 설비의 구성비로부터 종합적인 복합부하특성을 파악하는 모형이다. 그밖에 계통에 외란이 작용한 상황에서의 실측정보를 이용하여 시스템 식별(system identification)에 의한 축약모형이 있다.

부하는 특성별로 일정 부하, 주거용 부하, 산업용 부하, 상업용 부하, 그밖의 부하로 대별할 수 있다. 이와같이 대별한다 해도 계절에 따라 개별 설비부하의 구성비가 달라지므로 다양한 부하모형의 데이터 베이스를 구축해 둔 다음 적절한 모형이 반영되도록 해야 한다. 부하구성에 대한 정보가 없으면 대표적인 부하 윈도우를 지정해 주면 된다.

개별부하의 모형은 부하의 전압 및 주파수 특성으로 표현할 수 있다.

$$P_L(V,f) = a_p + b_p\Delta V + c_p\Delta V^2 + d_p\Delta V^3 + e_p\Delta V^4 + f_p\Delta V\Delta f + g_p\Delta f$$

$$Q_L(V,f) = a_q + b_q\Delta V + c_q\Delta V^2 + d_q\Delta V^3 + e_q\Delta V^4 + f_q\Delta V\Delta f + g_q\Delta f \quad (11)$$

식 (11)의 고차식 대신에 지수함수식으로 표현하기도 한다. 즉,

$$P_L(V,f) = K_p V^{\alpha_p} (\alpha_{pf} \Delta f) \quad (12)$$

$$Q_L(V,f) = K_q V^{\alpha_q} (\alpha_{qf} \Delta f)$$

표 2. 가정용 개별부하의 대표적인 모형

P _L Q _L	a _p	b _p	c _p	d _p	e _p	f _p	g _p
	a _q	b _q	c _q	d _q	e _q	f _q	g _q
텔레비전	0.943	1.186	0.739	3.616	-14.592	-0.089	0.287
	0.331	1.569	0.565	3.915	0.416	0.051	0.705
전기밥솥	0.936	1.892	0.921	-2.317	-2.956	-0.194	-0.082
	0.076	0.161	0.066	0.199	-0.228	1.881	0.989
펌 프	0.904	0.723	1.793	-0.973	-8.339	-3.859	1.554
	0.768	2.486	5.425	-2.792	-29.159	-10.646	-0.586

표 3. 우리나라의 겨울철 주거용 부하 윈도우

구성설비	T.V.	냉장고	밥 솥	전열기	조 명	기 타	합 계
구성비(%)	7.3	2.6	25.3	36.3	12.6	15.7	100

표 4. 미국의 겨울철 주거용 부하 윈도우

구성설비	T.V.	백열등	형광등	전열기	전조기	냉장고	전자렌지	기타	합계
구성비(%)	1.1	15.0	2.0	56.9	1.0	18.0	4.0	2.0	100.0

표 2는 가정용 부하설비 3가지에 대한 계수들의 대표적인 값을 나타낸 것이다. 표 3과는 4는 각각 우리나라와 미국 가정의 겨울철 대표적인 부하모형을 나타낸 표로 구성비의 현저한 차이를 알 수 있다.

6. 결 언

이상으로 배전계통에서의 주요 설비에 대한 모형들을 살펴보았다. 어떤 모형이 더 타당한가? 하는 데는 논란의 여지가 있을 수 있다. 우선 정확한 모형보다는 주어진 문제영역에 적합한 모형을 선택해야 할 것이다. 이것은 문제해결을 위한 적용해법이 어떤 것인가에 따라 달라진다. 일반적인 선택의 기준은 배전계통 자동화를 위한 컴퓨터 레벨에서 대규모 배전계통의 실용해가 구해질 수 있어야 한다. 그것도 가능하면 요구데이터의 양이 적으면서도 양호한 수렴성과 빠른시간내에 실행되는 것이 좋음은 당연하다.

근년 컴퓨터 관련분야의 비약적인 발전추세는 배전계통 기술의 성력화(省力化)에 크게 기여할 것으로 예상된다. 이러한 측면에서 볼때 배전계통 해석 이론의 정립, 실제용 자료의 전산화, 시뮬레이션에 의한 제반 특성파악과 적합한 모형의 구축 등 폭넓

은 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M.S. Chen, W.E.Dillon, "Power System Modeling", Proc. IEEE, Vol. 62, No. 7, pp. 901-915, July 1974.
- [2] J.Arrillaga, C.P.Arnold, "Computer Modeling of Electrical Power Systems", New Zealand, John Wiley & Sons 1983.
- [3] Energy Systems Research Center, The University of Texas at Arlington, "Generalized Distribution Analysis System-Feasibility Study", Final Report for Con. Edison Co. Project 92087, June 1989.
- [4] T.H. Chen, M.S.Chen, K.J.Hwang, et al. "Distribution System Power Flow Analysis-A Rigid Approach", Submitted to IEEE Winter Meeting (1991)
- [5] Energy Systems Research Center, The University of Texas at Arlington, "Determining Load Characteristics for Transient Performance", Final Report of EPRI Project RP 849-3, Vol. I,II,III, Dec. 1978.
- [6] 이봉용, 이경재 외, "전력시스템 해석을 위한 정태부하특성", 전력계통 학술연구발표회, 대한전기학회, 1990년 4월.