

배전계통에서 ZIP모델을 활용한 효과적인 전압 해석법

손준호*, 지성호*, 전진택*, 노대석*, 양정태**
 한국기술교육대학교* 한국폴리텍V대학**

Effective voltage analysis method in distribution system using ZIP model

Joonho Son*, Seongho Ji*, Jintaek Jeon*, Daeseok Rho*, Jeongtae Yang**
 Korea University of Technology and Education*, Korea Polytechnic V**

Abstract - 2012년부터 시행 예정인 신재생에너지 의무할당제(RPS)의 도입으로 향후 태양광 및 풍력 등의 그린 에너지가 향후 지속적으로 배전계통에 연계, 운용될 것으로 예상된다. 이때 정상상태의 계통전압을 해석하기 위해서는 부하모델링이 필수적이다. 본 논문에서는 가장 많이 활용되고 있는 ZIP 부하모델을 활용하여 배전계통에서 효과적인 전압해석법을 제안하고, 수치해석 및 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제안한 전압해석법의 유효성을 검증한다.

정전류 부하는 소비하는 전력이 전압의 변화에 비례하여 변화하는 부하로 유효전력과 무효전력은 전압에 비례한다. 즉 전압이 저하함에 따라 비례적으로 소비 전력도 감소하는 부하이며 계통 전체부하의 대략 20%를 차지하며 아래의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} = |I| \angle \theta - \phi \tag{2}$$

여기서, $V = |I| \angle \theta, \phi = \tan^{-1} \frac{Q}{P}$

1. 서 론

전력부하의 성질은 경향성, 순환성, 계절성, 수렴성, 유사성을 가지고 있으며 모선에 걸려있는 부하는 용도별, 계절별, 일형식별, 지역별 등으로 구분된다. IEEE에서 정하고 있는 부하는 3가지로 정의되고 있다. 계통부하는 계통에 연결된 모든 설비와 장치에 의해 소모되는 유효·무효전력의 합이며, 모선부하는 계통모델에서 명확하게 표현할 수 없지만, 단독으로 모선에 연결되어 전력을 소비하는 것으로 볼 수 있는 계통의 한 부분이다. 즉 모선에 걸려있는 부하들과 변전소의 변압기, 배전급전선, 병렬캐패시터, 전압조정기, 소비자의 변압기, 전선, 캐패시터 등 선로에 가한 모든 부하이다. 마지막으로 발전기부하는 발전기나 발전소의 출력을 의미한다. 본 논문에서는 모선부하로 이용되고 있는 ZIP모델을 활용하여 계통전압을 해석하고자 한다.

2.3 정전력 부하($P \propto V^0$)

정전력 부하는 소비하는 전력이 전압의 변화와 무관한 부하로 만약 계통전압이 강하게 되면 부하전류가 증가하여 소비전력은 항상 일정하게 되는 특성을 가짐으로 가장 악성부하로 볼 수 있다. 전력은 저장이 어려워 전력보존의 법칙(에너지 보존법칙)적용이 불가능함으로 시간의 개념을 삭제한 가장 현실적인 부하모델이다. 대표적인 정전력 부하는 인버터, 에어컨, 전동기 등이며 계통 전체부하의 대략 50%를 차지한다. 전기 제품의 증가에 따라 특히 하절기 중부하시의 전압 불안정 현상의 원인으로 되고 있다. 부하들은 이들 모델들의 선형 결합, 유효전력과 무효전력이 전압의 다항식으로 표현된다. 일반적으로 모선 i 의 유효전력 P_{ri} 과 무효전력 Q_{ri} 은 식 (3)과 같이 표현된다.

2. ZIP 모델

부하특성과 동작을 특정 짓는 데에는 2종류의 부하 모델이 있다. 첫 번째 모델은 부하 수요모델이고, 두 번째 모델은 부하 응답모델이다. 이 중 계통 특성 해석에 영향을 미치는 것은 후자의 부하 응답모델이다. 모선부하에서의 전압과 주파수의 변동은 일반적으로 그 모선에 접속된 부하의 유효전력과 무효전력에 영향을 끼친다. 그러나 수많은 경제 운용에 관한 부하 모선 전압이 제어 함수로 주어질 경우에는 동작과 부하와의 관계를 파악해야 한다. 계통 운용 한계와 관련해서 부하와 전압 특성은 아주 중요한 요소이다. 일반적으로 계통해석을 위한 부하의 종류는 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 부하가 소비하는 전력이 전압의 제곱에 비례하여 변화하는 부하 즉 정 임피던스 부하(Constant Z)이며, 부하가 소비하는 전력이 전압의 변화와 비례하여 변화하는 부하 이를 정전류 부하(Constant I)라고 한다. 마지막으로 부하가 소비하는 전력이 전압의 변화와 무관한 부하로 정전력 부하(Constant P)라고 한다. 상기의 3가지 부하를 일컬어 ZIP모델이라고 한다. 즉 이 모델은 일정 어드미턴스, 전류, 전력의 합으로 표시하며, 주파수특성은 대개 1차식의 부가적인 표현으로 생략하여 전압에 대한 관계식만으로 표현한다. 전력 거래소의 연구과제에 의하면[1] 여름 15시를 기준으로 정임피던스 P와 Q는 35.1%, 44.4%이며 정전류 P와 Q는 각각 14.1%, 29.3%이다. 그리고 정전력 P와 Q는 50.8%, 26.3%이다.

$$P_{ri} = \sum_{j=1}^{N_p} C_{pj} V_i^{K_{pj}}, Q_{ri} = \sum_{j=1}^{N_q} C_{qj} V_i^{K_{qj}} \tag{3}$$

여기서, $C_{pj}, C_{qj}, K_{pj}, K_{qj}$ 는 모델화 과정에서 결정되거나 현장 데이터에 의해서 결정되는 정수

3. ZIP모델을 활용한 효과적인 전압 해석법

배전계통의 전압해석 시 상기에서 언급한 Constant Z, I, P에 대한 특성을 반드시 고려해야만 실제계에 근접한 전압해석이 가능하다. 식 (4)는 배전계통에서 일반적인 전압강하 계산식이다. 전압강하 해석에 중요한 요소는 부하전류 및 선로임피던스이며 선로임피던스는 지중 및 가공선로를 공급하는 업체에서 제공되는 1km당 선로임피던스 값에 선로길이를 곱함으로써 쉽게 얻을 수 있다. 한편 정임피던스, 정전류, 정전력 부하 특성에 따라 공급되는 부하전류는 다를 수밖에 없다. 하지만 부하 변동에 따른 부하전류 특성을 파악한다면 효과적인 전압 해석이 가능하다. 계통 전압을 일정하게 송출하기 위해서 배전용 변전소에서 설치 및 운용되고 있는 ULTC(Under Load Tap Changer) 및 배전선로 말단에 설치되어 전압을 보상할 수 있는 SVR(Step Voltage Regulator)에서 계통전압을 일정하게 송출한다고 가정하고, 말단집중부하의 각 부하에 걸리게 되는 상전압이 일정하다면 식 (5)와 같이 정임피던스를 기준으로 정전류 부하와 정전력 부하를 등가 변환할 수 있다. 즉 그림 1을 그림 2와 같이 변경할 수 있음을 의미한다.

$$\Delta V = I \times (R \cos \theta + j X \sin \theta) \tag{4}$$

여기서, ΔV : 전압강하분, I : 부하전류 $R \cos \theta + j X \sin \theta$: 선로임피던스

$$\begin{aligned} \text{Constant } Z &= 1 \\ \text{Constant } I &= 1.2 \times \text{Constant } Z \\ \text{Constant } P &= 1.5 \times \text{Constant } Z \end{aligned} \tag{5}$$

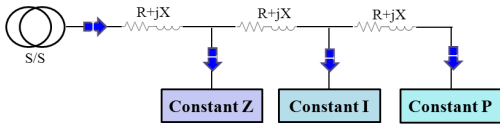
여기서, Constant Z : 정임피던스 부하, Constant I : 정전류 부하, Constant P : 정전력 부하

2.1 정임피던스 부하($P \propto V^2$)

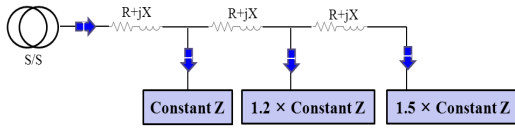
전압과 부하의 관계를 기준으로 부하의 종류를 분류한다면, 부하의 전압 특성은 부하 전력 P 전압 V에 대해서 $P \propto V^m$ 로 표현되며, m의 값이 작을수록 전압 안정도면에서 가혹해진다. 정임피던스 모델은 부하가 소비하는 전력이 전압의 제곱에 비례하여 변화하는 부하로 전압이 저하함에 따라 그 제곱으로 소비 전력이 감소한다. 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며 대표적인 정임피던스 부하는 전등, 전열 부하이며 계통 전체 부하의 대략 30%를 차지한다. 회로적으로 표시하여 손쉽게 풀 수 있지만 실제 부하 특성과는 거리가 있다.

$$Z = \frac{V \cdot V^*}{I \cdot I^*} = \frac{|V|^2}{P - jQ} \tag{1}$$

2.2 정전류 부하($P \propto V^1$)



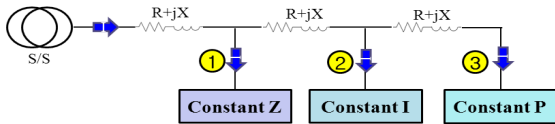
〈그림 1〉 배전계통의 ZIP 모델



〈그림 2〉 정임피던스 기준 등가 변환 모델

4. ZIP모형을 활용한 효과적인 전압 해석법 검증

제안한 전압 해석법을 검증하기 위해서 모의 배전계통을 선정하여 수치해석 및 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다. 먼저 그림 3과 같이 모의 배전계통을 선정하였으며 ZIP부하의 연계형태는 말단집중부하(Spot Loads)이고 ①, ②, ③지점의 상전압을 분석한다. 세부 제원은 표 1과 같다.



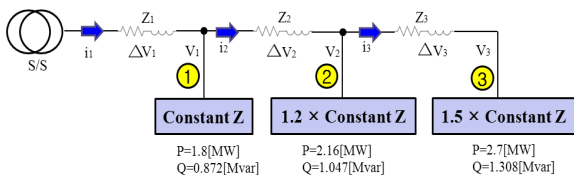
〈그림 3〉 모의 배전계통

〈표 1〉 모의 배전계통 파라미터

종류	내용	
배전용 변전소	45[MVA]	
계통 기준전압	22.9[kV]	
역률	0.9	
배전선로	ACSR-160, ①지점 10[km], ②지점 20[km], ③지점 30[km]	
ZIP 모델	Constant Z	①지점 2[MVA]
	Constant I	②지점 2[MVA]
	Constant P	③지점 2[MVA]

4.1 수치해석

그림 4와 같이 역률 0.9를 고려하여 모의 배전계통에 연계된 부하를 정임피던스 기준으로 등가 변환하였다. 말단집중부하형태의 전압강하를 해석하기 위해서는 먼저 ①, ②, ③지점을 기준으로 유입전력을 이용하여 부하전류를 계산한다. 그리고 선로 임피던스를 계산하여 선로의 전압강하분을 계산하여 부하연계지점의 전압을 구할 수 있다.



〈그림 4〉 정임피던스 기준, 모의 배전계통 등가 변환 모델

(1) 부하전류 계산

부하전류 계산은 아래의 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 i_{1p} &= \frac{P_1}{\sqrt{3} \times V \times \cos\theta} = \frac{6,660}{\sqrt{3} \times 22.9 \times 0.9} = 186.57[\text{A}] \\
 i_{2p} &= \frac{P_2}{\sqrt{3} \times V \times \cos\theta} = \frac{4,860}{\sqrt{3} \times 22.9 \times 0.9} = 136.14[\text{A}] \\
 i_{3p} &= \frac{P_3}{\sqrt{3} \times V \times \cos\theta} = \frac{2,700}{\sqrt{3} \times 22.9 \times 0.9} = 75.64[\text{A}]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

여기서, i_{1p} : ①지점의 부하전류, i_{2p} : ②지점의 부하전류, i_{3p} : ③지점의 부하전류

(2) 선로 임피던스 계산

선로 임피던스 계산은 아래의 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 z_1, z_2, z_3 &= (R \cos\theta + X \sin\theta) \times l \\
 &= (3.47 + j7.46[\%]) \times l \\
 &= (0.18 + j0.39[\Omega]) \times l \\
 &= (0.18 \times 0.9 + 0.39 \times 0.436) \times 10 \\
 &= 3.32[\Omega]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기서, z_1 : ①지점의 선로임피던스, z_2 : ②지점의 선로임피던스, z_3 : ③지점의 선로임피던스, l : 선로의 길이[Km]

(3) 선로 전압강하 및 부하연계지점 전압 계산

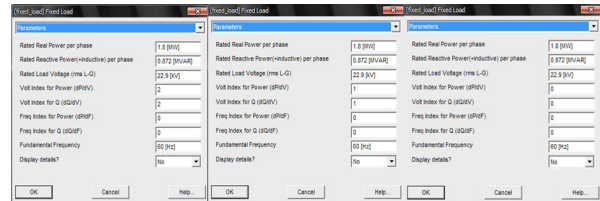
아래의 식과 같이 선로 전압강하 및 부하연계지점의 전압을 계산한다.

$$\begin{aligned}
 \Delta V_1 &= z_1 \times i_{1p} = 3.32 \times 186.57 = 619.41[\text{V}] \\
 V_1 &= 13,200 - 619.41 = 12,580.59[\text{V}] \\
 \Delta V_2 &= z_2 \times i_{2p} = 3.32 \times 136.14 = 451.98[\text{V}] \\
 V_2 &= 12,580.59 - 451.98 = 12,128.61[\text{V}] \\
 \Delta V_3 &= z_3 \times i_{3p} = 3.32 \times 75.64 = 251.12[\text{V}] \\
 V_3 &= 12,128.61 - 251.12 = 11,877.49[\text{V}]
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

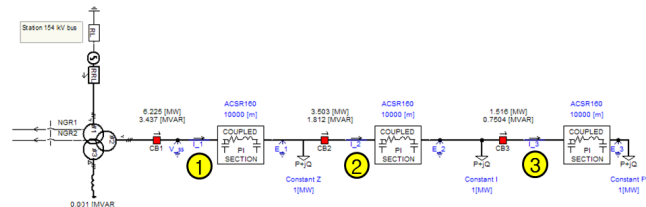
여기서, $\Delta V_1, V_1$: ①지점의 선로 전압강하 및 부하연계지점 전압, $\Delta V_2, V_2$: ②지점의 선로 전압강하 및 부하연계지점 전압, $\Delta V_3, V_3$: ③지점의 선로 전압강하 및 부하연계지점 전압

4.2 PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링

PSCAD의 Fixed Load 소자를 이용하여 그림 5와 같이 ZIP 모델을 선정하였으며, 표1의 제원을 이용하여 그림 6과 같이 모델링 하였다. 그리고 시뮬레이션 하여 ①, ②, ③지점의 상전압을 분석하였다.



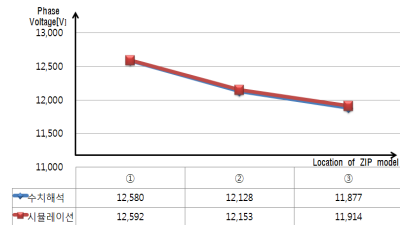
〈그림 5〉 ZIP모델(좌:정임피던스, 중:정전류, 우:정전력)



〈그림 6〉 모의 배전계통 모델링

4.3 시뮬레이션 분석

수치해석과 시뮬레이션 수치가 거의 일치함을 그림 7과 같이 확인할 수 있다.



〈그림 7〉 수치해석 및 시뮬레이션 비교

5. 결론

본 논문에서는 계통전압과 부하에 걸리는 상전압이 같은 경우, 배전계통에서 가장 많이 활용되고 있는 ZIP 부하모델을 활용한 효과적인 전압 해석법을 제안하여 수치해석 및 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 값과의 비교/분석을 통해서 제안한 전압 해석법의 유효성을 확인 하였다.