

## PU법에 의한 DC 회로계산 및 실계통 데이터를 이용한 전압강하/고장계산 방법

(A Lecture Note on PU Method thru Calculation of a Simple DC Circuit and  
Voltage/Fault Analysis of Industrial Power Systems using Actual Data)

이상중\*

(Sang-Joong Lee)

### Abstract

This paper presents a lecture note of pu method for power system analysis. The author tries to help students in class better understand the fundamental of pu calculation using a very simple DC circuit.

And a voltage drop calculation by pu method for a distribution system is given to help understand the importance of the vector reference in AC circuit analysis. A short current calculation by pu method for a power system with a generator, transformer and transmission line is also presented to show how pu calculation can be applied to real power systems, in which all the data are the ones currently being used by KEPCO and other industrial sites.

Key Words : Pu, DC Circuit, System Base, Vector Reference, Fault Analysis

### 1. 서 론

전기회로는 대개 전압, 전류, 전력 및 임피던스의 네 가지 변수로 구성된다.

$$P = I^2 \cdot R \text{ Watt} \quad (1)$$

$$I = \frac{V}{R} A$$

기존 공식에 따라 전기회로를 계산할 때 우리는 이들 변수들이 Volt, Ampere, Watt, Ohm 등 각각 다른 차원의 단위를 가지는 것을 당연한 상식으로 받아들여 왔다. pu법이란 회로를 해석할 때 전압, 전류, 전력 및 임피던스의 system base 값을 우선 지정한 다음,

$$pu \text{ 값} = \frac{\text{실제 parameter 값}}{\text{system base 값}} \quad (2)$$

의 계산을 통하여 system 내의 모든 parameter 값으로 지정된 base의 상대 값, 즉 단위가 없는 pu값으로 바꾸어 계산하는 방법이다.

\* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수  
\* Main author : Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Electrical Engineering, Professor, PE  
Tel : 02-970-6411, Fax : 02-978-2754  
E-mail : sjlee@seoultech.ac.kr  
접수일자 : 2014년 8월 15일  
1차심사 : 2014년 10월 6일, 2차심사 : 2014년 10월 10일  
심사완료 : 2014년 10월 15일

pu법을 사용할 경우

- 변압기가 포함된 AC 회로에서 변압기의 권수비를 회로계산에서 생략할 수 있고
- 회로 계산에 있어  $\sqrt{3}$  등 특정 상수의 사용을 생략할 수 있다. 또한 pu로 표시된 값은 정격값과의 차이를 한 눈에 알아볼 수 있다. 특히 전압 값은 기기의 용량에 무관하게 대부분 정격전압과 비슷한 값으로 주어진다. 간단한 회로의 경우 기존의 Ohm법으로도 손쉽게 해석이 가능하지만 전력계통과 같이 발전기, 변압기 및 tap changer 등을 다수 포함하는 복잡한 회로의 경우 수많은 종류의 전압이 존재하게 되어 연산이 매우 복잡해진다. 따라서 대규모 전력계통 연산에는 pu법이 사용되고 있다. pu 연산법은 이미 오래 전부터 이론이 확립되어 각종 전기회로 특히, 전력계통의 해석에 널리 응용되어 왔으며 이미 많은 문헌들이 pu법에 대하여 훌륭하게 설명하고 있다[1-10]. 그러나 오랜 강의 경험을 통해 저자가 느껴온 바, 대부분의 기존 문헌은 pu법의 기초 개념을 설명하는 쉬운 예제보다 상당한 예비지식을 필요로 하는 수준급 예제를 주로 다루고 있고 예제로 주어진 sample 시스템과 거기에 적용되는 데이터도 현재 실제 운용중인 산업현장과 다소 차이가 있다는 것이다. 따라서 본 논문은 우선, 복잡한 system을 어렵게 푸는 예제보다는 가급적 간단하고 더 체계적인 예제를 통하여 초보자가 전력계통에서 pu법의 원리를 쉽게 배울 수 있도록 하고 또한 현재 운용 중인 실계통을 소개하여 pu법이 발송배전 실무에 어떻게 응용되고 있는지를 학생들이 이해할 수 있도록 현장 데이터 분석 예제를 제시하고자 한다.

## 2. PU법에 의한 간단한 DC 회로계산

그림 1은 전원, 선로, 부하저항으로 구성된 전기공학 입문 수준의 간단한 DC 회로이다. 부하  $R_L$ 에서 소비되는 전력  $P_L=18\text{Watt}$ , 부하단 전압  $V_L=9\text{V}$ , 선로저항  $R=2\Omega$ 이라 할 때 송전단 전압  $V_s$  계산방법을 비교 검토하고자 한다[11].

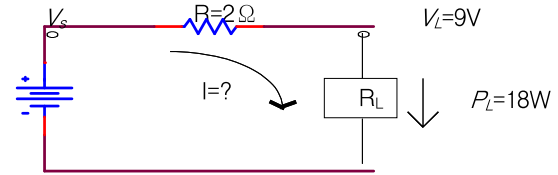


그림 1. 간단한 DC 회로  
Fig. 1. A simple DC circuit

### 2.1 Ohm법에 의한 계산

부하전압  $V_L$ 이 주어졌으므로 송전전압  $V_s$ 는 아래의 전압강하 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$V_s = V_L + I \cdot R \quad (3)$$

부하전류(=선로전류)  $I$ 는,

$$I = \frac{18 \text{ Watt}}{9 \text{ V}} = 2 \text{ A} \quad (4)$$

이다. 이를 식 (3)에 대입하면,

$$V_s = V_L + I \cdot R = 9 + 2 \cdot 2 = 13 \text{ V} \quad (5)$$

로 송전단 전압  $V_s$ 를 구할 수 있다.

### 2.2 pu법에 의한 계산 - V, P 지정

pu법은 주어진 회로 system에서 우선 전압, 전류, 전력 및 임피던스의 base 값을 지정하고 system 내의 모든 parameter 값을 이 base 값에 대한 상대 값으로 바꾸어 계산하는 방법이다. 그러나 전압, 전류, 전력 및 임피던스는 서로 함수관계에 있으므로 이 중 두 개의 base 값이 주어지면 다른 두 변수의 base 값은 상호관계식에 의해 자연히 결정된다.

그림 1의 경우 전압과 전력을 system base로 선정하고 이들을 각각  $V_b, P_b$ 라 정의하자. base 값은 영이 아닌 임의의 값으로 지정이 가능하지만 여기서는  $V_b=10\text{V}, P_b=10\text{Watt}$ 로 지정하기로 한다. 그러면 전류와 저항의 base 값  $I_b, R_b$ 는 아래와 같이 자동적으로 결정된다.

$$I_b = \frac{P_b}{V_b} = 1 A \quad (6)$$

$$R_b = \frac{V_b^2}{P_b} = \frac{100}{10} = 10 \Omega \quad (7)$$

pu 계산을 위하여 회로내의 모든 parameter 값을 식 (2)에 따라 pu값으로 바꾸면

$$V_{Lpu} = \frac{V_L}{V_b} = \frac{9}{10} = 0.9 \quad (8)$$

$$R_{pu} = \frac{R}{R_b} = \frac{2}{10} = 0.2$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b} = \frac{2}{1} = 2$$

이 값을 식 (3)에 대입하면

$$\begin{aligned} V_{Spu} &= V_{Lpu} + I_{pu} \cdot R_{pu} \\ &= 0.9 + 2 \cdot 0.2 = 1.3 \end{aligned} \quad (9)$$

을 얻는다. 이 값은 pu 값이므로, 식 (2)로부터

$$V_S = V_{Spu} \cdot V_b = 1.3 \times 10 = 13 V \quad (10)$$

가 되어  $V_S$ 의 실제 값 13V를 얻게 된다.

pu법에 의한 계산결과가 Ohm법으로 계산된 (5)와 일치함을 확인할 수 있다.

### 2.3 pu법에 의한 계산 - I, R 지정

그림 1에서 이번에는

$$I_b = 100 A \quad (11)$$

$$R_b = 1 \Omega \quad (12)$$

을 base 값으로 지정하고 같은 계산을 해 보자.

이 경우 전압과 전력의 base 값  $V_b, P_b$ 는 아래와 같이 자동적으로 결정된다.

$$V_b = I_b \cdot R_b = 100 V \quad (13)$$

$$P_b = I_b^2 \cdot R_b = 10,000 \text{ Watt} \quad (14)$$

pu 계산을 위하여 회로내의 모든 parameter 값을 pu값으로 바꾸면

$$V_{Lpu} = \frac{V_L}{V_b} = \frac{9}{100} = 0.09 \quad (15)$$

$$R_{pu} = \frac{R}{R_b} = \frac{2}{1} = 2$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b} = \frac{2}{100} = 0.02$$

이 값을 식 (3)에 대입하면

$$\begin{aligned} V_{Spu} &= V_{Lpu} + I_{pu} \cdot R_{pu} \\ &= 0.09 + 0.02 \cdot 2 = 0.13 \end{aligned} \quad (16)$$

식 (2)로부터

$$V_S = V_{Spu} \cdot V_b = 0.13 \times 100 = 13 V \quad (17)$$

가 된다. pu법에 의한 계산결과가 Ohm법으로 계산된 식 (5)와 일치함을 확인할 수 있다. 또한 전압-전류-전력-임피던스 중 어떤 변수 두 개를 system base로 지정하든 또한, base 값을 어떤 크기로 지정하든 pu 계산결과는 동일함을 식 (10)과 (17)을 통하여 확인할 수 있다[11].

### 2.4 Ohm법과 pu법의 비교

2장에 제시된 간단한 DC회로의 경우 Ohm법이 pu법에 비해 훨씬 간단하다. 그러나 다수의 발전기와 변압기를 포함하는 3상 전력시스템의 경우에는 pu법을 사용하는 것이 더 유리해 진다.

## 3. 실계통 데이터를 이용한 배전선의 전압강하 계산

한전 154kV 녹양변전소의 154/22.9kV 변압기로부터 약 10km 떨어진 지점에 의정부 종합운동장의 22.9kV 수전변압기가 설치되어 있다. 변전소와 수전

변압기를 연결하는 배전선로(D/L)는 ACSR 160mm<sup>2</sup>이며 완금은 2,400mm를 사용하였다. 의정부 종합운동장의 peak시 부하를 4,224 + j1,760kVA로 가정하고 수전 전압  $V_R$ 을 22.0kV 이상으로 유지하고자 할 때, 녹양변전소 22.9kV 측의 최소 유지전압  $V_S$  계산방법을 비교 검토하고자 한다.

### 3.1 pu법에 의한 계산

ACSR 배전선의 r 및 x 값은 표 1에 주어져 있다 [12-14]. 표 1로부터 ACSR 160mm<sup>2</sup>, 완금 2,400mm 전선로 10km 길이의 선로 임피던스  $Z_L \Omega$ 을 계산하면

$$Z_L = (.182 + j.391) \times 10 \text{ km} = 1.82 + j3.91 \Omega \quad (18)$$

이 된다.

표 1. ACSR 배전선의 r+jx 값  
Table 1. r+jx value of ACSR D/L

ACSR mm <sup>2</sup>	R $\Omega$ /km	x $\Omega$ /km	
		완금 1800	완금 2400
240	0.120	0.282	0.308
160	0.182	0.370	0.391
95	0.304	0.420	0.440
58	0.497	0.438	0.459
32	0.899	0.462	0.482

주어진 예제의 회로도를 그리면 그림 2와 같다.

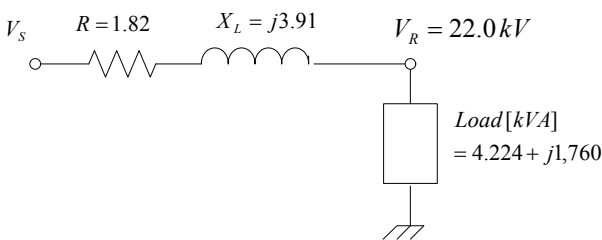


그림 2. 녹양 S/S - 의정부종합운동장 배전선로  
Fig. 2. D/L of Nokyang S/S-Uijeongbu Complex

전력 시스템의 경우 대개 3상 MVA 용량과 kV 선간전압을 system base로 선정한다. 여기서는 3상

base MVA 용량  $MVA_b$ 와 base 선간전압  $kV_b$ 를 다음과 같이 지정한다.

$$MVA_b = 1 \text{ MVA} \quad (19)$$

$$kV_b = 22.0 \text{ kV}$$

교류회로의 전압, 전류, 전력, 임피던스 값은 모두 벡터값(또는 phasor)이므로 회로 연산 시 우선 기준벡터(또는 기준 phasor, 또는 vector reference)를 지정하는 과정이 필요하다. 실제 전력계통의 연산에서는 적당한 모션 하나를  $\angle 0^\circ$ 로 지정한다.

수전 변압기의 단자전압  $V_R$ 을 기준벡터로 지정하면

$$V_R = 22.0 \angle 0^\circ = 22.0 + j0 \text{ kV} \quad (20)$$

가 된다.

다음은 회로내의 모든 parameter 값을 pu값으로 바꾸는 과정이 필요하다.

부하모션 전압의 pu값 :

$$V_{R-pu} = \frac{\text{실제부하 } kV}{kV_b} = \frac{22.0 \angle 0^\circ}{22.0} = 1.0 \angle 0^\circ \quad (21)$$

부하 MVA의 pu값 :

$$MVA_{L-pu} = \frac{\text{실제부하용량}}{MVA_b} = \frac{4.224 + j1.76}{1} = 4.224 + j1.76 \quad (22)$$

선로전류의 pu값 :

$$I_{pu} = \left( \frac{MVA_{L-pu}}{V_{R-pu}} \right)^* = \frac{4.224 - j1.76}{1.0} = 4.224 - j1.76 \quad (23)$$

선로의 base 임피던스 :

$$Z_{Lb} = \frac{1\text{상의 base } kV_b}{\text{base 선전류}} = \frac{kV_b / \sqrt{3}}{MVA_b / \sqrt{3} kV_b} = \frac{(kV_b)^2}{MVA_b} = \frac{22^2}{1} = 484 \Omega \quad (24)$$

선로의 pu 임피던스 :

$$Z_{Lpu} = \frac{Z_L}{Z_{Db}} = \frac{1.82 + j3.91}{484} \quad (25)$$

$$= .00376 + j.00807$$

이로부터 아래 그림과 같은 pu 등가회로를 만들 수 있다.

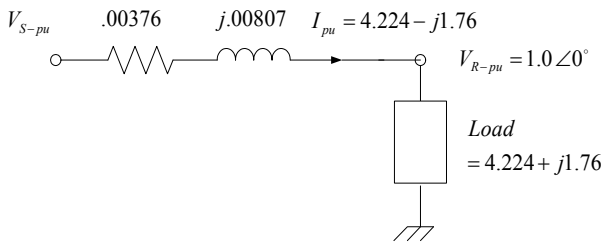


그림 3. pu로 표시된 배전선로  
Fig. 3. PU values in a distribution line

등가회로로부터 pu 송전단 전압  $V_{S-pu}$  를 계산하면

$$V_{S-pu} = V_{R-p.u.} + I_{pu} Z_{Lpu} \quad (26)$$

$$= 1.0 + (4.224 - j1.76) \times [.00376 + j.00807]$$

$$= 1.0 + .01588 + .0142 + j(0.034 - .0066)$$

$$= 1.0301 + j.0274$$

실제 송전단 전압의 크기  $V_s$  kV는

$$V_s = k V_b \times V_{S-pu} \quad (27)$$

$$= 22 \times \sqrt{1.0301^2 + .0274^2}$$

$$\approx 22.66 \text{ kV}$$

의정부 종합운동장의 수전전압을 22.0kV 이상으로 유지하자면 녹양변전소 22.9kV 측은 최소한 22.66kV 이상을 유지해야 함을 알 수 있다.

### 3.2 Ohm법에 의한 계산

그림 2에서 배전 변압기의 피상전력  $S$ 와 전압-전류  $V, I$ 의 관계

$$S = \sqrt{3} V_R I^* = 4,224 + j1,760 \text{ kVA} \quad (28)$$

로부터 선전류는

$$I = \frac{(4,224 + j1,760 \text{ kVA})^*}{\sqrt{3} * 22 \text{ kV}} = \frac{192 - j80}{\sqrt{3}} \text{ A} \quad (29)$$

가 되고, 선로 impedance  $Z_l = 1.82 + j3.91 \Omega$ 에 의한 3상 전압강하  $V_{drop}$ 는

$$V_{drop} = \sqrt{3} Z_l I = \sqrt{3} (1.82 + j3.91) \frac{192 - j80}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

$$= (349.44 + 312.8) + j(750.72 - j145.6)$$

$$= 662.24 + j605.12 \text{ V}$$

가 된다. 따라서 송전단 전압의 복소수 값은

$$V_s = V_R + V_{drop} \quad (31)$$

$$= 22,000 + (662.24 + j605.12)$$

$$= 22,662 + j605 \text{ V}$$

가 되고 그 크기는

$$|V_s| \approx 22.66 \text{ kV} \quad (32)$$

가 된다. 계산결과가 pu법에 의한 결과와 동일함을 확인할 수 있다.

### 3.3 Ohm법과 pu법의 비교

3상 전선로의 전압강하를 계산할 때 pu법을 사용하면 회로를 단상으로 취급할 수 있다. 따라서 Ohm법을 사용하는 경우에 비하여,  $\sqrt{3}$ 을 곱하고 나누는 과정을 생략할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 실계통 데이터를 이용한 전력시스템의 고장계산

그림 4와 같이 1,570kVA 용량의 수차 발전기와 3.3/22.9kV, 3,400kVA의 변압기 및 22.9kV 송전선로로 구성된 피산 수력발전소에서 발전기가 무부하로 운전되고 있다. 발전기의 %동기리액턴스 및 변압기의

%X는 각각, 31.6% 및 6.0%이다. 22.9kV 송전선로는 ACSR 160mm<sup>2</sup>, 완금은 2,400mm를 사용하였다. (단, 10km 이후 지점에서 발전소 방향으로 역류되는 단락 전류는 없다고 가정한다.) 변압기로부터 10km 떨어진 지점에서 3상 단락이 발생할 경우 사고지점의 단락전류 계산방법을 검토한다.

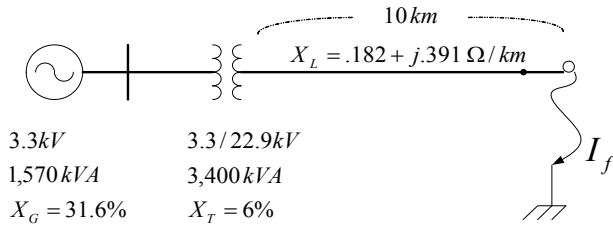


그림 4. 송전선로의 3상 단락  
 Fig. 4. Three phase fault in a power system

표 1로부터, ACSR 160mm<sup>2</sup>, 완금 2,400mm 전선로 10km의 임피던스 Z<sub>L</sub> Ω을 계산하면[12-14]

$$Z_L = (.182 + j.391) \times 10 \text{ km} = 1.82 + j3.91 \Omega \quad (33)$$

3상 base MVA 및 선간전압 base를 MVA<sub>b</sub> 및 kV<sub>b</sub>로 정의하고 그 값을 다음과 같이 지정한다.

$$MVA_b = 1 \text{ MVA}, \text{ kV}_b(\text{선로측}) = 22.9 \text{ kV} \quad (34)$$

변압기가 포함된 AC 계통의 경우 변압기의 1, 2차 전압이 권수비에 따라 각각 다른 base 값을 가지는 점에 유의하여야 한다. 즉 3.3/22.9kV 변압기의 경우 선로측의 base 전압을 22.9kV로 지정할 경우에 발전기측의 base 전압은 3.3kV가 된다[1-10].

22.9kV 선로측의 base전류 I<sub>b-22.9</sub>는

$$I_{b-22.9} = \frac{MVA_b}{\sqrt{3} kV_b} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 22.9 \text{ kV}} = 25.21 \text{ A} \quad (35)$$

가 되고, 선로의 base 임피던스 Z<sub>Lb</sub>는

$$Z_{Lb} = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{22.9^2}{1} = 524.4 \Omega \quad (36)$$

가 된다.

회로내의 모든 parameter 값을 pu값으로 바꾸어 보자. 우선 선로의 pu 임피던스를 구하면

$$Z_{L-pu} = \frac{Z_L}{Z_{Lb}} = \frac{1.82 + j3.91}{524.4} = .00347 + j.00745 \quad (37)$$

시스템 내의 발전기, 변압기 등의 nameplate에 주어진 %X 값은 자기 용량을 기준으로 주어진 값이므로 앞서 지정한 system MVA<sub>b</sub>로 환산해 주는 과정이 필요하다. 정격용량이 MVA<sub>G</sub>인 발전기의 %동기리액턴스 값이 %X<sub>G</sub>로 주어진 경우 이 값을 pu 리액턴스 X<sub>G-pu</sub>로 변환하는 공식은 아래와 같다[1-10].

$$X_{G-pu} = \frac{\%X_G}{100} \cdot \frac{MVA_b}{MVA_G} \quad (38)$$

위 식으로부터 그림 4의 발전기와 변압기의 pu 리액턴스 X<sub>G-pu</sub>와 X<sub>T-pu</sub>를 구하면

$$X_{G-pu} = \frac{31.6}{100} \cdot \frac{1}{1.57} = j.201 \quad (39)$$

$$X_{T-pu} = \frac{6}{100} \cdot \frac{1}{3.4} = j.017 \quad (40)$$

변압기가 존재하는 AC 계통의 경우, Ohm법에서는 1-2차 임피던스 환산시 권수비의 제곱을 곱하거나 나누는 복잡한 계산이 필요하다. 그러나 pu법을 사용할 경우 변압기의 1차 %X와 2차 %X가 동일하다는 점을 이용하면 변압기를 직렬 리액턴스로 대체시킬 수 있어 연산이 매우 간단해진다[1-10]. 그림 4에서 단락전류를 공급하는 전원은 발전기의 유기기전력이다. 유기기전력의 pu 값 V<sub>G-pu</sub>는 발전기가 정격전압으로 운전되고 있다면

$$V_{G-pu} = \frac{\text{발전기유기전압}}{\text{발전기측 kV}_b} = \frac{3,300 \text{ V}}{3,300 \text{ V}} = 1.0 \quad (41)$$

가 된다. 이로부터 그림 5와 같은 pu 등가회로를 얻을

수 있다.

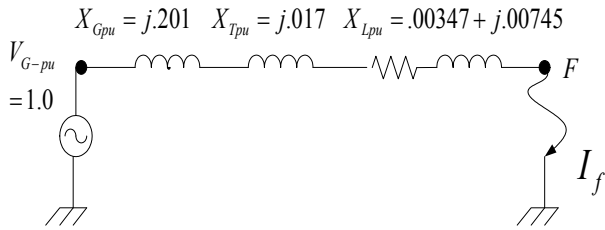


그림 5. 송전선로 3상 단락 pu 등가회로  
Fig. 5. PU equivalence of 3-phase fault in a T/L

등가회로에서 합성 pu 임피던스는

$$\begin{aligned} Z_{Tot-pu} &= X_{G-pu} + X_{T-pu} + Z_{L-pu} \\ &= j.201 + j.017 + (.00347 + j.00745) \\ &= .00247 + j.225 \end{aligned} \quad (42)$$

가 되고  $V_{G-pu}$  와  $Z_{Tot-pu}$  로 축약된 등가회로는 그림 6 과 같다.

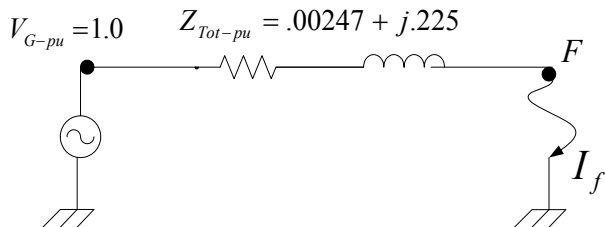


그림 6. 축약된 3상 단락 pu 등가회로  
Fig. 6. Reduced pu equivalence of 3-phase fault

F 점의 pu 단락전류  $I_{F-pu}$  는 전압  $V_{G-pu}$  와 합성 임피던스  $Z_{Tot-pu}$  가 만드는 전류이므로

$$I_{F-pu} = \frac{1.0}{j.225} = -j4.44 \quad (43)$$

가 되고, 3상 단락전류의 실제 크기  $I_F$  A는

$$I_F = I_{F-pu} \cdot I_b = 4.44 \cdot 25.21 = 112.0 \text{ A} \quad (44)$$

가 된다.

## 5. 기존문헌상의 예제

그림 7과 같은 system이 있다. 모선전압을 22.9kV로 유지하는 변전소에서 50MW, 역률 0.8(lag)인 부하를 공급한다. 전원 측의 모선전압  $V_s$ 를 계산한다[2].

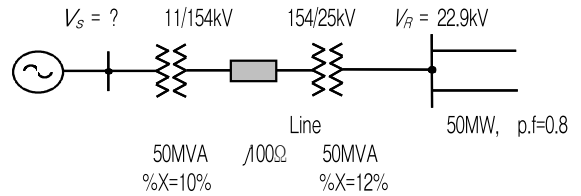


그림 7. 두 개의 변압기가 있는 전력계통  
Fig. 7. A power system with two transformers

Base MVA를 100으로 하면

$$\text{부하모선전압의 pu값: } V_{R-pu} = \frac{22.9}{25} = 0.916 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \text{선로pu리액턴스: } X_{l-pu} &= j100 \frac{MVA_b}{k V_{l-l}^2} \\ &= j0.42 \end{aligned} \quad (46)$$

$$\text{전원측변압기 } X_{S-pu} = X_S \frac{MVA_b}{MVA_{old}} = j0.2 \quad (47)$$

$$\text{부하측변압기 } X_{R-pu} = X_R \frac{MVA_b}{MVA_{old}} = j0.24 \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \text{선로전류pu값: } I_{pu} &= \frac{.5 - j.375}{.916} \\ &= .546 - j.409 \end{aligned} \quad (49)$$

전원측의 모선전압의 pu값은

$$\begin{aligned} V_{S-pu} &= V_{R-pu} + I_{pu} \times j(0.2 + 0.42 + 0.24) \\ &= 1.26 + j.47 \end{aligned} \quad (50)$$

전원측의 모선전압  $V_s$ 의 크기는

$$V_s = 11 \cdot \sqrt{1.26^2 + j.47^2} = 14.8 \text{ kV} \quad (51)$$

위 예제는 기존 문헌에서 제시하고 있는 예제로서, 실무관점에서 볼 때 몇 가지 검토되어야 할 점이 있다. 우선 154/22.9kV 변압기의 용량이 50MVA인데 비하여 부하의 피상전력은 62.5MVA로서 변압기가 과부하 상태임으로 정상적으로는 있기 힘든 상황이다. 또한 우리나라의 경우 154/22.9 변압기의 용량은 40/60MVA가 대부분인데 비하여 변압기의 용량과 부하는 각각 50MVA 및 62.5MVA가 주어져 있는 것도 재검토가 필요하다. 그리고 송전선의 임피던스를  $j100\Omega$ 으로 표기하고 있는데 전력계통을 처음 배우는 학생들에게는, 154kV의 경우 리액턴스의 약 1/5 정도 크기의 저항도 같이 존재한다는 것을 가르쳐 주는 것이 좋지 않을까 생각된다. 따라서 저항성분과 리액턴스 성분이 큰 차이가 없는 배전선로의 예제를 먼저 강의하고 나서 송전선로 예제를 풀면서 “송전선로에도 저항이 존재하지만 리액턴스가 저항보다 훨씬 크므로 (154kV의 경우 5배 정도, 345kV의 경우 20배 이상 등) 조류계산에서는 리액턴스만 고려해도 큰 오차는 없다”는 식으로 가르치는 것이 좋을 것으로 사료된다. 문제풀이를 위한 예제보다는 가능하면 예제 자체를 통하여 학생들이 실무에 대한 지식을 얻을 수 있는 문제가 학생들의 교육차원에서 더 효과적일 것이며 향후에도 실무를 기반으로 하는 좋은 예제가 많이 발굴되어야 할 것으로 사료된다. 또한 현장 실계통을 pu법 예제로 사용함으로써 교수로서는 본인이 직접 눈으로 본 현장을 더 생동감 있게 강의하게 되고, 학생들은 실무현장에 대한 호기심으로 강의에 더 귀를 기울이게 됨으로써 학생들의 학습 성과를 높이는 효과를 가져올 것으로 기대된다.

## 6. PU법의 이해 정도에 대한 설문조사

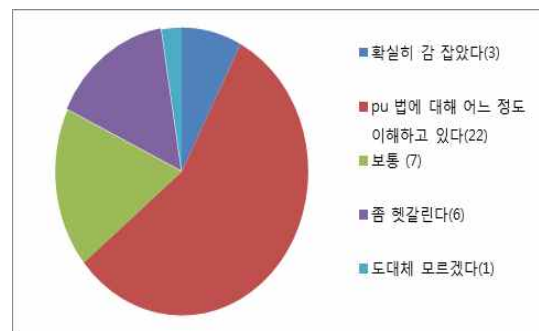
DC회로 예제에서  $V-P$ 를 base로 지정한 경우와  $I-R$ 을 또 다른 임의의 값으로 지정한 경우 모두 Ohm 법 풀이와 똑같은 해가 나오는 것을 보고는, 대부분의 학생들이 호기심을 가지고 강의에 더 집중하는 변화를 발견할 수 있었다. 실제 2014년 2학기에 약 2주 정도, 본 논문에 주어진 예제로 pu법을 강의한 후 그림 1의 DC 회로와 그림 7의 두 개의 변압기가 있는 전력

계통을 pu법으로 푸는 Quiz를 실시한 결과 DC 회로의 경우 40명 중 22명(55%)의 학생이 완전한 정답을 제출하였다. 두 개의 변압기가 있는 3상 전력계통의 경우, 40명 중 16명(40%)의 학생이 정답에 가까운 답안을 제출하였다. 부분적인 정답을 제출한 학생들을 포함하면 약 55% 이상의 학생들이 pu법 강의를 어느 정도 이해한 것으로 해석된다. Quiz 후 실시한 간단한 설문조사 결과 25명(64.1%)의 학생들이 “나는 pu법에 대해 어느 정도 이해를 하고 있다고 생각한다.”고 대답하였다. 한편 11명(27.5%)의 학생들이 “pu법이 재미있고 신기하다.”라고 응답하였고, 13명(33.3%)의 학생들이 “pu법이 조금은 재미있다.”라고 답변하였다. 60% 이상의 학생들이 어느 정도 호기심을 가지고 pu법 강의를 들었다는 것으로 해석된다.

아래는 2014년 10월 1일, Quiz에 응시한 학생들을 대상으로 실시한 설문지 문항과 응답결과이다.

Q1. pu법을 어느 정도 이해하고 있습니까?

- 확실히 감 잡았다 (3명)
- pu법에 대해 어느 정도 이해하고 있다 (22명)
- 보통 (7명)
- 좀 헛갈린다 (6명)
- 도대체 모르겠다 (1명)



Q2. DC 회로의 pu 해석을 어느 정도 이해하고 있습니까?

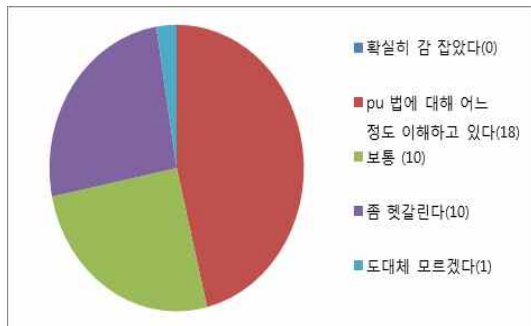
- 확실히 감 잡았다 (6명)
- 어느 정도 이해하고 있다 (17명)
- 보통 (8명)
- 좀 헛갈린다 (8명)
- 도대체 모르겠다 (0명)





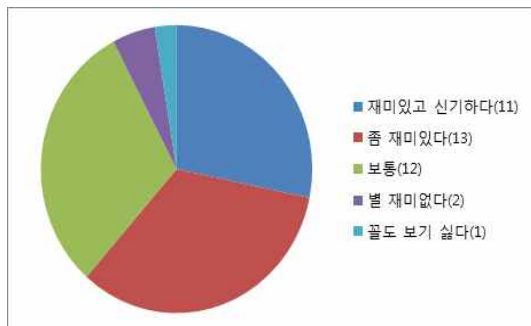
Q3. 변압기가 두 개 있는 AC 회로의 pu 해석을 어느 정도 이해하고 있습니까?

- 확실히 감 잡았다 (0명)
- 어느 정도 이해하고 있다 (18명)
- 보통 (10명)
- 좀 헛갈린다 (10명)
- 도대체 모르겠다 (1명)



Q4. pu법이 재미있는 테크닉이라 생각합니까?

- 재미있고 신기하다 (11명)
- 좀 재미있다 (13명)
- 보통 (12명)
- 별 재미없다 (2명)
- 꼴도 보기 싫다. (1명)



## 7. 결 론

본 논문은 우선 복잡한 system을 어렵게 푸는 예제 보다는 가급적 간단하면서 체계적인 예제를 통하여 초보자가 pu법의 원리를 쉽게 배울 수 있도록 노력하였다. 입문 수준의 간단한 DC 회로를 예제로 제시하여  $V-P$ 를 base로 지정한 경우와  $I-R$ 을 base로 지정한 경우에 대한 두 가지 연산결과를 비교함으로써  $V-P-I-R$  중 어떤 두 개를 system base로 지정 혹은 base 값을 어떤 크기로 지정하든 푸는 과정은 달라도 연산결과와는 같게 됨을 보였다. 또한 현재 운용 중인 실계통을 소개하여 pu법이 발송배전 실무에 어떻게 응용되고 있는지를 학생들이 이해할 수 있도록 현장 데이터로 분석하는 예제를 제시하고자 하였다. 실제 배전선로의 전압강하를 계산하고 AC 회로를 pu법으로 연산하는 경우 vector 기준을 지정하는 문제에 대해 구체적으로 설명하였으며 실제 운전 중인 발전소를 예로 들어 현장 데이터 값으로 고장전류를 계산하는 예제를 도시하였다. 예제 자체를 읽는 것만으로도 실무에 대한 지식을 얻을 수 있는 예제가 학생들의 학습성과를 제고시킬 수 있는 좋은 문제일 것이며, 향후에도 실무를 기반으로 하는 좋은 예제를 많이 개발해 나가야 할 것으로 사료된다. 본 논문에 기술된 pu법 해석이론과 실계통 연산을 통하여 학생들의 현장 적용에 도움을 줄 수 있는 자료로서 본 논문이 활용되기를 기대한다.

This study was supported by the Research Program funded by the Seoul National University of Science and Technology.

## References

- [1] J. Kim et al, "Transmission Engineering" Moonwoondang, pp 33-39, 2010.
- [2] B. Lee, "Power Transmission Engineering" Moonwoondang, pp 43-50, 1990.
- [3] KIEE, "Distribution Engineering", Books Hill, pp 369-370, 2011.
- [4] K. Song, "Power Transmission-Distribution Engineering" Chungmoongak, pp 274-281, 2010.

- [5] K. Park, I. Hong, "Power System Engineering", Dongil Publication, pp 218-224, 2009.
- [6] J. Park, "Power System Engineering", Chungmoongak, pp 16-22, 2001.
- [7] B. Kim, "Analysis of Industrial Power System and Protection", Gidari, pp 3-12, 2006.
- [8] H. Kim, D. Lee, Y. Hwang, "Easy Explained Power System Engineering", Taeyoung Publication, p 195, 2001.
- [9] Y. Moon, H. Kim, H. Nam, J. Park, Y. Baek, "Power System Engineering", SciTech Media, pp 46-52, 1998.
- [10] Pieter Schavemaker, Lou van der Sluis, "Electrical power System Essentials", Wiley, pp 39-42, 2008.
- [11] Sang J. Lee, "A Lecture Note on P.U. Analysis of a Simple DC Circuit", Proceedings of KIIEE Autumn Annual Conference 2012, COEX, Seoul, pp 39-40, Oct 19, 2012.
- [12] KEPCO Human Resource Center, "Distribution OJT 1" Ch. 4 Power Line Installation, p 48, Feb 2012.
- [13] KEPCO Business Dept, "Warranty on Electric Power Supply" Ch 4. Electric Power Supply, p 52, 2010.
- [14] KEPCO Human Resource Center, "Transformer Operation" Ch 6. OLTC, p 265, May 2011.
- [15] ABEEK Documentations, Dept of Electrical Enigneering, SeoulTech., 2010~2014.

◇ 저자소개 ◇



**이상중**(李尙中)

1955년생. 부산공업고등전문학교 전기과 5년 졸업. 성균관대학교 전기공학과 졸업. 충남대학교 대학원 졸업(박사). 1987~1988년 PSEC 수료(Power System Engineering Course, GE Research Center in Schenectady, NY). 1976년 한국전력 입사. 1988~1996년 한전전력연구원 계통연구실. 1995년 한전전력연구원 수화력발전연구실 부장. 1996년 한전보령화력본부 복합시운전, 제어계측부장. 1998년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수.