

# 변압기 여자돌입에 의한 전력품질 분석

## Analysis of Power Quality by Transformer Inrush Current

徐 熏 徹<sup>†</sup> · 呂 相 敏<sup>\*</sup> · 金 喆 煥<sup>\*\*</sup> · 柳 永 植<sup>\*\*\*</sup> · 趙 範 燮<sup>§</sup>

(Hun-Chul Seo · Sang-Min Yeo · Chul-Hwan Kim · Young-Sik Lyu · Burm-Sup Cho)

**Abstract** - The transformer inrush current can cause a voltage drop by source impedance. This current can impact sensitive loads by the voltage drop. Therefore, it is necessary to take measures to limit this inrush current. This study, described in this paper, analyzes the power quality affected by transformer inrush current using the X power system in Korea. The Electromagnetic Transients Program (EMTP) is used to analyze the transient phenomenon. We discuss a method to model the hysteresis curve of the transformer in EMTP. We carried out various simulations to analyze the power quality during transformer energization. The analysis results of voltage drop by the inrush current occurrence when certain requirements are met are presented.

**Key Words** : Transformer Inrush Current, Power Quality, EMTP, Jeju Power System

### 1. 서 론

변압기는 전력계통에서 필수적인 요소이다. 송전계통에서는 발전단에서 생성된 전압을 계통전압으로 승압시켜 주는 역할을 담당하며, 배전계통에서는 계통전압을 각 부하에 해당하는 전압으로 낮추어주는 역할을 담당하고 있다. 따라서, 변압기의 가압은 계통에서 반드시 필요하다. 변압기 가압 시 크기가 크고, 많은 고조파를 함유하고 있는 여자돌입전류가 발생하며 이 전류는 변압기의 수명감소 및 손상, 보호계전기의 오동작 가능성 등 전력계통에 악영향을 미치게 된다. 여자돌입전류는 전원과 변압기 사이의 임피던스로 인하여 일시적인 전압강하를 유발한다[1-2].

X 전력계통의 발전소에 설치된 모든 변압기 중 A T/P 주 변압기의 용량은 100MW로서, 이는 전체 X 전력계통 용량의 20-30%를 차지하고 있다. 만약, 이 변압기가 가압된다면, 변압기의 낮은 임피던스 때문에 전원 임피던스로 인한 전압강하가 증가될 수 있다. 따라서, 이 변압기를 가압할 때 여자돌입전류에 의한 전압강하 분석이 필요하다.

본 논문에서는 X 전력계통의 A T/P의 주 변압기의 가압 시 여자돌입전류에 의한 전력품질의 영향을 분석하였다. 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 모의 분석을 수행하였으며, 그 구성은 다음과 같다. 첫째, 변압기 여자돌입과 전력품질의 상관관계에 대하여 분석하였다. 둘째, A T/P의 주 변압

기의 시험 데이터를 이용하여 여자돌입전류를 모델링하였다. 셋째, 이러한 모델링을 X 전력계통에 적용하여 시뮬레이션의 정확성을 증명하였다. 넷째, 다양한 조건에 따라 시뮬레이션을 수행한 후, 전압강하의 경향 및 그 정도를 분석하였다.

### 2. 변압기 여자돌입과 전력품질[1]

변압기 여자돌입은 전원과 가압된 변압기 사이의 임피던스에 의하여 일시적인 전압강하를 유발한다. 다음 그림 1은 전원과 변압기 사이의 계통의 등가회로를 보여준다. 그림 1에서 전원 임피던스에 의한 전압강하는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

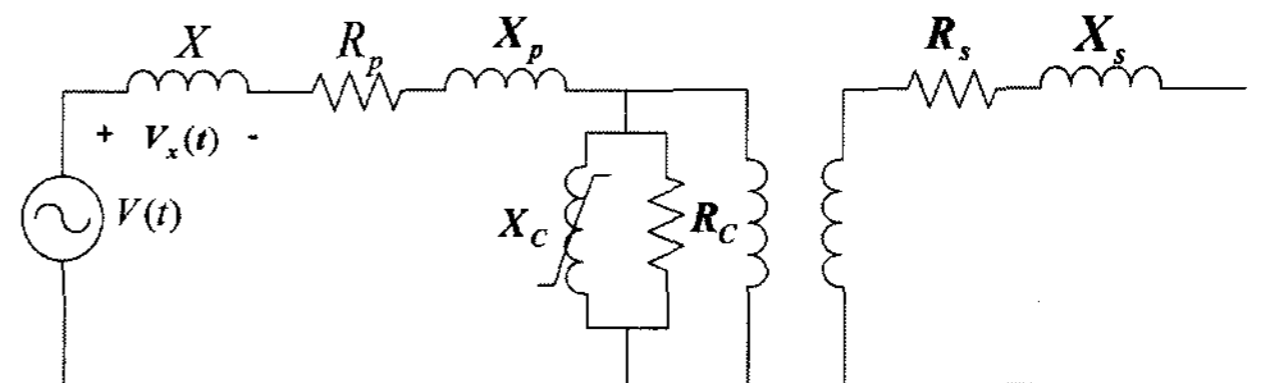


그림 1 전원과 변압기 사이의 등가회로  
Fig. 1 The equivalent circuit of the system

$$V_x(t) = \frac{X}{X + X_p + R_p + X_c} V(t) \quad (1)$$

여기서, X: 전원 임피던스,  $X_p$ : 변압기 1차측 리액턴스,  $R_p$ : 변압기 1차측 저항,  $X_c$ : 변압기의 자화 리액턴스

정상상태에서는  $X_c$ 가 매우 크기 때문에 전원 임피던스에 의한 전압강하도 거의 발생하지 않는다. 반면에, 여자돌입 시에는  $X_c$ 의 크기가 작기 때문에 전원 임피던스에 의한 전

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 基礎電力研究員 電力시스템研究室 研究員  
E-mail : hunchul12@snu.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 成均館大 大學院 電子電氣工學科 博士課程

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 成均館大 情報通信工學部 教授 · 工博

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 한국전력거래소 계통보호팀 과장

<sup>§</sup> 正會員 : 한국전력거래소 부처장, 천안지사장

接受日字 : 2008年 3月 11日

最終完了 : 2008年 4月 1日

압강하가 발생하여 계통의 전압강하 또한 발생할 수 있다.

### 3. 변압기 여자돌입전류 모델링

#### 3.1 A T/P 주 변압기의 시험 데이터

본 논문에서 주 관심사인 A T/P 주 변압기의 시험 데이터는 다음 표 1과 같다. 시험 주파수는 60Hz이며, 저압측의 정격전압은 13.1kV이고, 기준 정격전력은 124MVA이다.

표 1 A T/P 주 변압기의 시험 데이터

Table 1 The A T/P main transformer test data

공급전압/√3 (Phase to ground)			전류(A)					무부하손실 (W)	
(%)	mean	rms	상		평균			Pm	Pc
			Ia	Ib	Ic	Io	%		
90	6809	6785	4.650	3.430	3.560	3.880	0.071	49118	49291
100	7565	7520	7.370	5.690	5.830	6.297	0.115	62108	62479
105	7941	7874	9.940	7.830	7.910	8.560	0.157	70742	71341
110	8318	8221	14.160	11.350	11.400	12.303	0.225	81510	82466

#### 3.2 시험 데이터를 이용한 히스테리시스 특성 모델링[3-6]

변압기의 여자돌입전류의 모델링을 위해서 변압기의 히스테리시스 특성의 정확한 모델링이 필요하다. 표 1의 시험데이터에서 필요한 값은 정격전압의 %값 및 여자전류의 %값이다. 히스테리시스의 모델링을 위하여 우선 EMTP의 L nonlinear Data Function 소자를 이용하여 전류-자속 데이터를 구해야 한다. 이 소자를 실행하면 punch 파일에서 전류-자속 데이터를 구할 수 있고, 이 값을 Hysteresis fitter 소자에 넣은 후 실행시키면, 변압기의 포화 특성 및 히스테리시스 특성의 모델링을 위한 계수값이 생성된다. 이 계수를 Hysteretic reactor 소자에서 불러오면 히스테리시스 특성의 모델링이 완료된다.

모델링 후 다음 그림 2의 히스테리시스 곡선의 추정이 가능하다. 포화점은 (12.31, 31.2095)이며, 이 곡선은 (0, 8.83496)을 통과한다. 따라서, 최대 잔류자속은 8.83496/31.2095=28.3%이다.

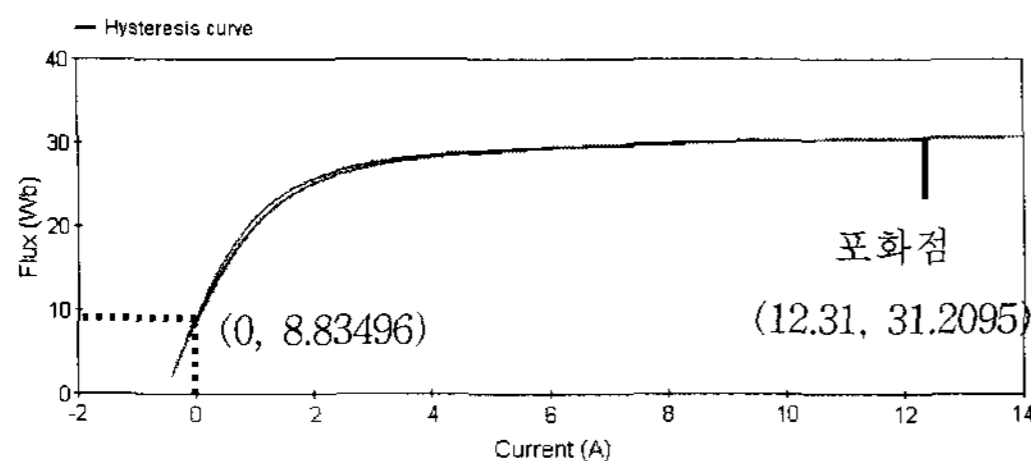


그림 2 히스테리시스 곡선

Fig. 2 Hysteresis Curve

### 4. 시뮬레이션

#### 4.1 X 전력계통 모델

변압기 여자돌입전류에 의한 전력품질 분석은 다음 그림

3의 X 전력계통 모델에서 수행하였다. X 전력계통은 발전소, 풍력발전, 송전선로 등으로 구성되어 있다. 다음 표 2는 각 모선의 부하량을 나타내고 있으며, 다음 표 3은 각 선로의 임피던스를 나타내고 있다.

X 전력계통의 동기발전기는 EMTP에서의 SM model을 이용하여 모델링하였다. 부하는 저항소자를 이용하였으며, 선로는 표 3과 같이 비교적 단거리 선로이므로 집중정수 모델을 이용하였다. A T/P 주 변압기외의 변압기는 본 논문의 주 관심사가 아니므로 모델링의 간략화를 위하여 히스테리시스 특성의 모델링은 생략하였다. 풍력발전의 모델링 또한 본 논문에서는 생략하였다.

표 2 각 모선에서의 부하량

Table 2 Load of Each Bus

모선명	부하량(MW)	모선명	부하량(MW)
H	72.33	C	30.803
E	26.304	D	24.148
F	76.126	G	36.19
B	27.581	J	29.394
합계 : 322.876MW			

표 3 각 선로의 임피던스

Table 3 Line impedance in Jeju Power System

선로명	길이(km)	정상분(%)	영상분(%)
가 T/L	31.159	1.3351+j5.9124	3.9582+j15.393
나 #1, #2 T/L	16.646	0.7067+j3.3294	1.9785+j8.3107
다 #1, #2 T/L	5.1000	0.0406+j0.5256	0.1126+j0.1820
라 T/L	26.600	1.1007+j4.7543	3.2840+j12.835
마 #1, #2 T/L	6.9900	0.0419+j0.6299	0.1183+j0.2153
바 #1, #2 T/L	13.000	0.5688+j2.6864	1.5943+j6.6819
사 T/L	19.529	0.8288+j3.8401	2.3672+j9.6651
아 T/L	34.437	1.4618+j6.6670	4.2734+j16.746
자 T/L	30.895	1.3114+j6.1305	3.8514+j14.361
차 #1, #2 T/L	7.0000	0.0547+j0.6978	0.1486+j0.2642
카 T/L	22.714	0.9642+j4.4350	2.7883+j11.120
타 T/L	46.684	1.9816+j9.2446	5.8197+j21.741
파 T/L	31.357	1.3310+j6.2209	3.8841+j14.679
하 T/L	20.875	0.8861+j4.0814	2.5433+j10.313

#### 4.2 시뮬레이션 결과의 검증[6]

X 전력계통에서의 여자돌입전류 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실측치와 비교, 고조파 분석의 두 가지 작업을 수행하였다.

다음 그림 4는 여자돌입전류의 실측치 파형을 나타내고 있다. 각 상에 흐르는 전류  $I_a, I_b, I_c$ 는 431.11A, 874.95A, 902.98A이며, 각 상에 걸리는 전압  $V_a, V_b, V_c$ 는 85113.59V, 80101.39V, 80604.26V이다. 그림 4를 통해 계통은 불평형 상태에서 동작중이며, 시간의 흐름에 따라 여자돌입전류는 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 4의 자료에 의해서는, 정확한 운전조건을 알 수 없다. 따라서, 실측치와 유사한 결과를 찾기 위하여 다양한 경우를 시뮬레이션 했으며, 그 결과 투입위상각 70°, 잔류자속 0%인 경우 A상을 기준으로 여자돌입전류는 428.66A, 그 때의 계통전압은 85523V임을 발

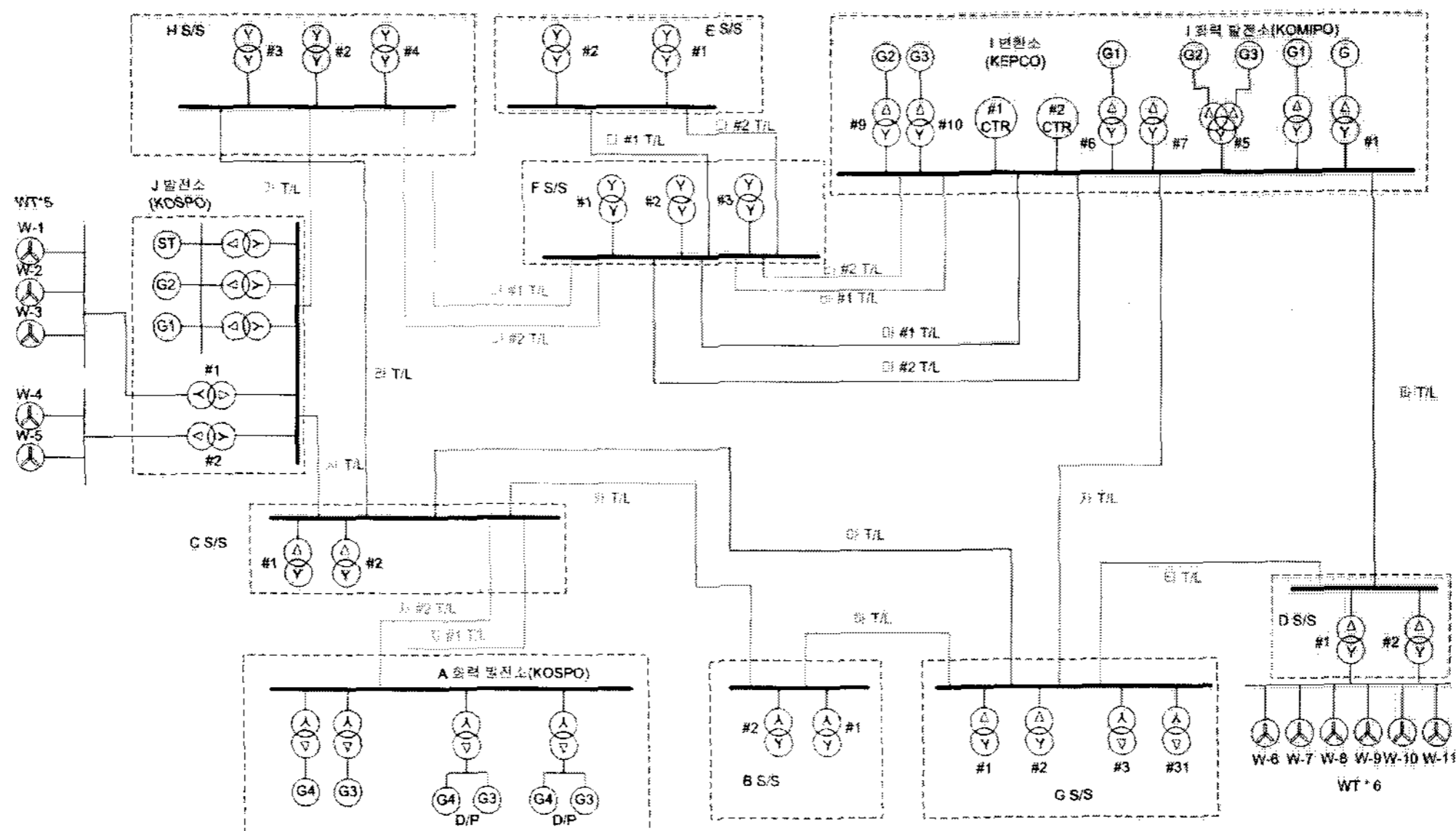


그림 3 X 전력계통 모델  
Fig. 3 Model of X power system

견하였다. 이 값을 실측치와 비교하면, 상당히 유사한 결과임을 확인할 수 있다. 다음 그림 5는 여자돌입전류가 가장 큰 경우, 즉, 투입위상각이 0도이고 잔류자속이 28.3%인 경우에 대한 고조파 분석 결과이다. 제 2고조파가 많으므로 전형적인 여자돌입전류 파형임을 확인할 수 있다.

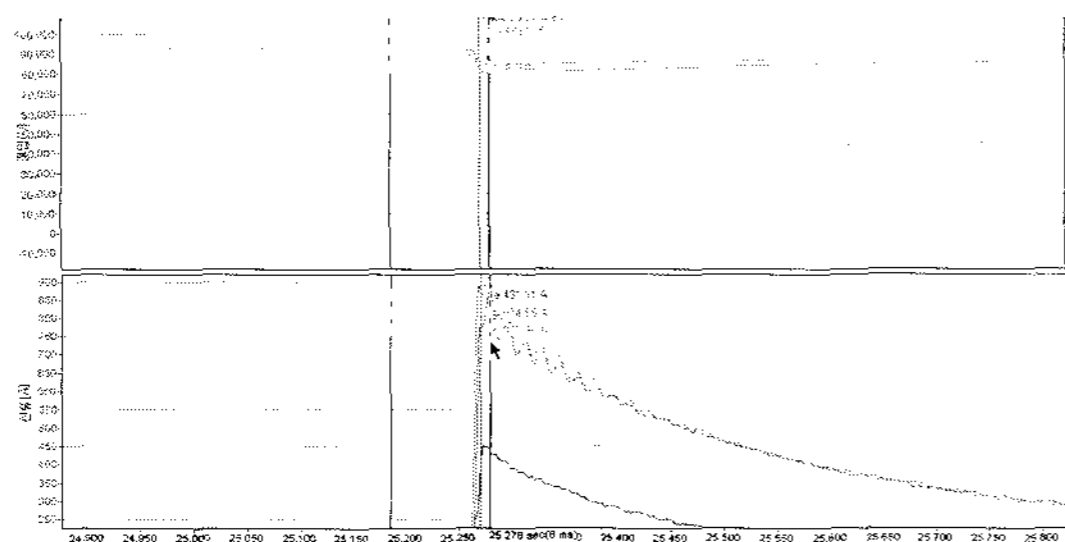


그림 4 여자돌입전류와 전압의 실측치 파형  
Fig. 4 The voltage and inrush current waveform recorded in the field

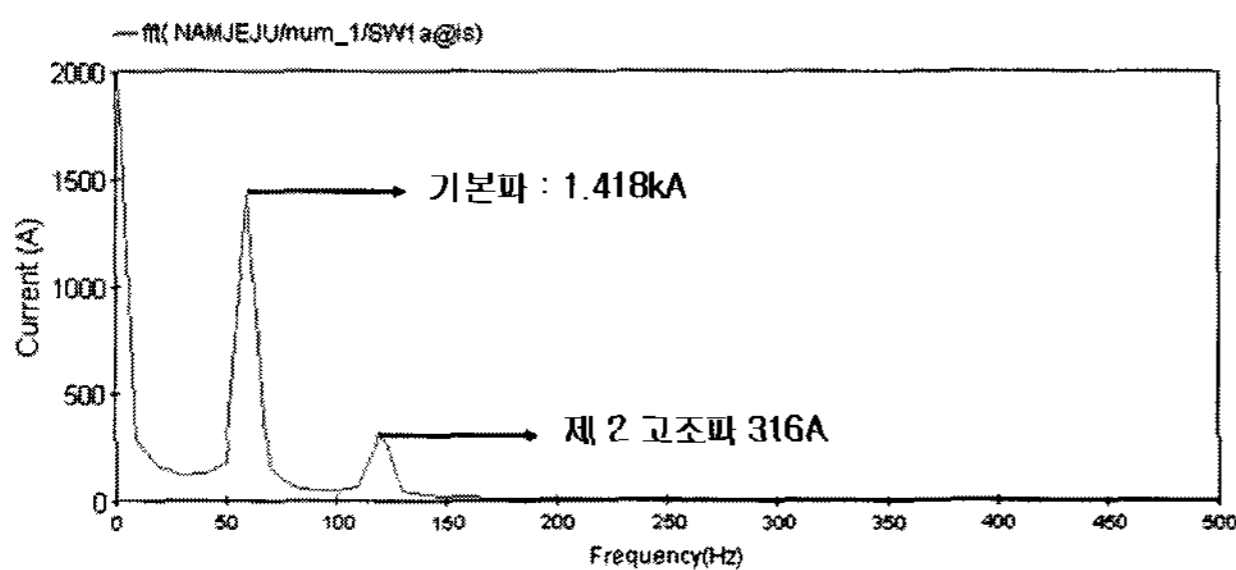


그림 5 Worst-case의 여자돌입전류에 대한 고조파분석  
Fig. 5 The harmonic analysis of inrush current at worst-case condition

### 4.3 시뮬레이션

실측치와 비교 및 고조파 분석을 통하여 모델링이 적절하게 수행되었음을 확인하였다. 따라서, 다양한 경우에 대해 분석하기 위하여 다음 표 4와 같은 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

다음 그림 6은 전압의 투입위상각이 0°이고, 잔류자속 28.3%, 부하량이 middle인 경우의 여자돌입전류의 순시치 파형을 나타낸다. A상의 최대치는 최대 3511A로서, 실효치로 나타내면 1947A가 되며, 2000A가 넘지 않음을 확인할 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

표 4 시뮬레이션 조건

Table 4 Simulation conditions

전압의 투입위상각	잔류자속	계통의 부하량
0°	28.3%	Peak
45°	15%	Middle
90°	0%	Off-Peak

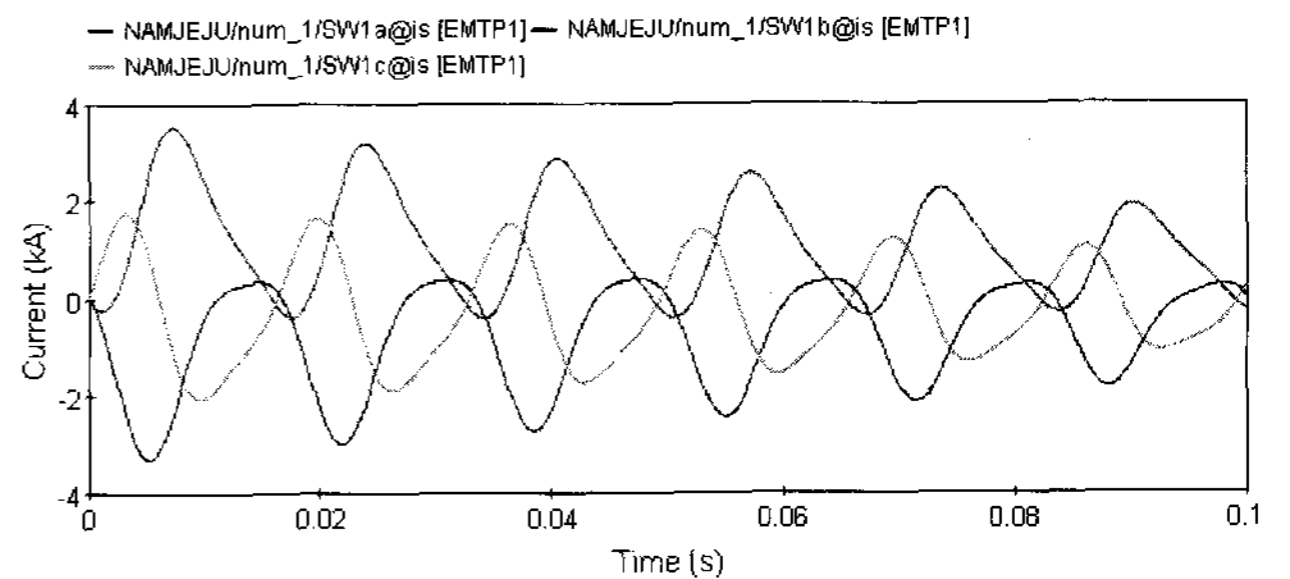


그림 6 전압의 투입위상각이 0°, 잔류자속 28.3%, 부하량이 middle인 경우 여자돌입전류의 순시치 파형  
Fig. 6 The instantaneous waveform of inrush current when the simulation conditions are the closing point of 0°, a remnant flux of 28.3%, and middle load

다음 그림 7은 이 경우의 각 모선의 전압강하량을 X 전력계통에 표시한 것이다. 3상의 전압은 거의 유사하므로, A 상에 대하여 각 모선의 최대 전압강하량을 X 전력계통에 표시하였다. 그림의 표시는 모선명, 여자돌입 시 전압 크기, 괄호 안은 여자돌입 시 전압강하량을 의미한다. A T/P의 인근모선인 A T/P, C S/S, J S/S의 전압강하가 최대 0.189pu으로 가장 크며, A T/P의 원격모선인 I S/S, F S/S, E S/S의 전압강하가 최대 0.160pu으로 다른 모선보다 전압강하가 작음을 알 수 있다.

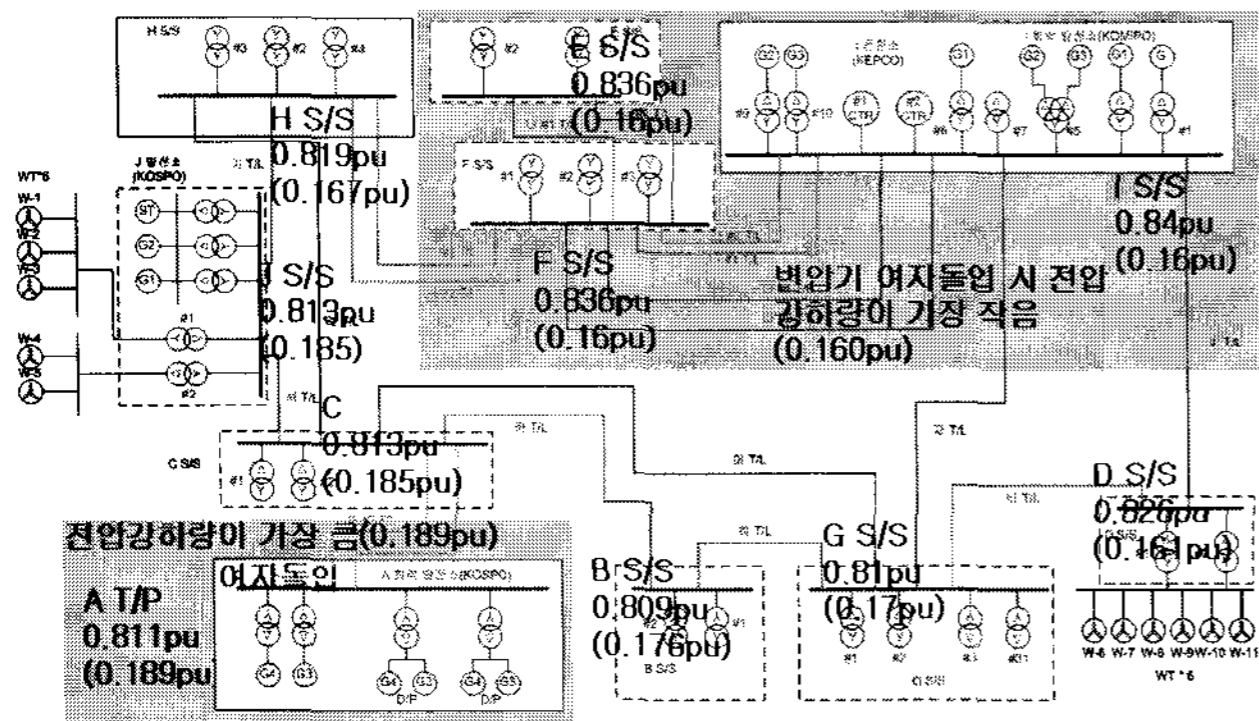


그림 7 X 전력계통에 표시한 각 모선의 전압강하  
Fig. 7 The voltage drop of each bus indicated in X power system

### 5. 결과 분석

#### 5.1 투입위상각의 변화에 따른 전압강하 분석

다음 그림 8은 잔류자속이 28.3%이고 부하가 peak인 경우 투입위상각에 따른 각 모선의 전압강하량을 보여준다. 그림 8에서, 0°에서의 전압강하가 가장 크며, 90°에서의 전압강하가 가장 작은 것을 알 수 있다. 즉, 투입위상각이 0°에 가까워짐에 따라 전압강하는 점점 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 다른 조건에 대해서도 성립한다.

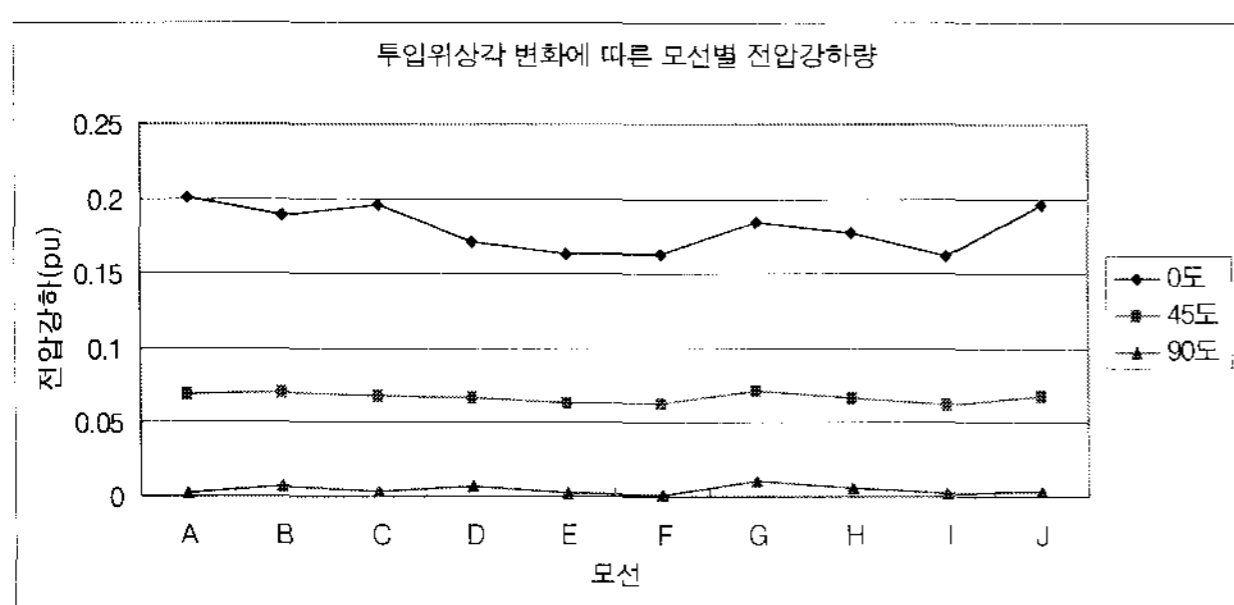


그림 8 잔류자속이 28.3%이고, 부하가 peak인 경우 투입위상각에 따른 각 모선의 전압강하량

Fig. 8 The voltage drop of each bus according to the closing point when the remnant flux is 28.3% and load is at peak

이러한 현상의 발생은 그림 1을 통하여 유도한 다음 식 (2)에 의하여 설명될 수 있다[1].

$$Max\ inrush\ current = \frac{1}{X + X_p + X_c(\min)} pu \quad (2)$$

$$Max\ voltage\ drop = \frac{X}{X + X_p + X_c(\min)} pu$$

식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 여자돌입전류 및 전압강하는 파라미터  $X_c$ 에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 투입위상각이 0°에 접근함에 따라  $X_c$ 가 작아져 여자돌입전류가 커지고, 이에 따른 전압강하는 커지기 때문이다.

다음 그림 9는 투입위상각의 변화에 따른 모선에서의 전압강하를 나타낸다. 모든 모선에서 동일한 형태를 띄며, 투입위상각 증가에 따라 전압강하량이 지속적으로 감소하는 형태임을 확인할 수 있다. 이것은 부하량 및 잔류자속의 변화에 관계없이 동일한 형태를 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 토대로 투입위상각의 변화에 따른 임의의 모선에서의 전압강하량을 추정한 결과 다음의 근사식 (3)을 구하였다.

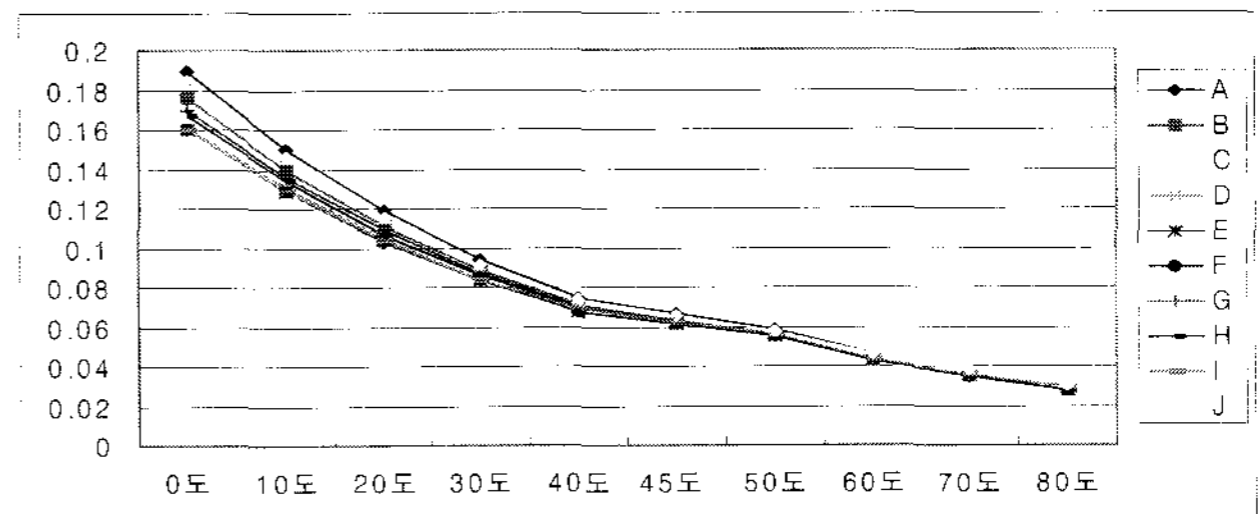


그림 9 투입위상각에 따른 모선의 전압강하  
Fig. 9 Closing point-on voltage wave versus voltage drop curve

(임의의 모선에서의 전압강하) = (최대전압강하) × (0.7936)<sup>X/10</sup> (3)  
여기서, (최대전압강하) = 투입위상각이 0도인 경우의 전압강하  
X = 전압의 투입위상각

단, 모든 모선에서 근사식 (3)이 성립하지는 않으며, 다음 표 5와 같은 특징을 보인다.

표 5 근사식 (3)의 적용 시 각 모선 전압강하량의 오차 범위

Table 5 The error range of each bus when the approximation equation (3) is applied

	A T/P의 인근 모선	A T/P의 원격 모선
특징	오차율 5% 이하	부하량에 따라 오차율 변화(부하량이 낮은 경우 오차율이 낮음)
오차 범위	A T/P : 0.74~5.11 C S/S : 1.13~5.04 J S/S : 1.13~5.04	E S/S : 1.81~8.01 F S/S : 1.81~7.90 I S/S : 2.92~7.85

A T/P로부터의 거리에 따라서 근사식 (3)에 따른 오차가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만, 평균오차는 5.5%



이고 A T/P의 오차가 가장 작다. 따라서, X 전력계통의 임의의 모선에서 여자돌입 시 전압강하 정도는 부하 및 A T/P부터의 거리에 따른 변화는 있지만, 근사식 (3)과 같이 전압강하 정도를 나타낼 수 있다. 근사식 (3)에서 0.7936은 전체 X 전력계통의 용량에 대한 A T/P 주변압기의 용량 비율 및 전체 선로정수에 기인한다고 볼 수 있다.

5.2 부하의 변화에 따른 전압강하 분석

다음 그림 10은 투입위상각이 45°, 잔류자속이 15%인 경우 부하변화에 따른 전압강하량을 나타낸다. 그림 10을 통하여 부하가 커질수록 전압강하 또한 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 모든 시뮬레이션 조건에 대하여 성립한다. 이러한 현상의 원인은 계통의 부하가 증가한다면 계통에 흐르는 전류가 증가하기 때문에 여자돌입전류 또한 증가하는 것에 의하여 설명될 수 있다. 부하 증가로 인하여 여자돌입전류가 증가하면 계통의 전압강하 또한 증가하게 된다.

부하가 최소인 경우(239.763MW)를 기준으로 부하 100MW가 증가할 때마다 증가되는 전압강하량 그래프를 그리면 다음 그림 11과 같다. 우선, 투입위상각에 따라 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 투입위상각이 0도인 경우가 45도인 경우보다 증가된 전압강하량/100MW 이 더 큰 것을 알 수 있다. 또한, 투입위상각이 0도와 45도인 경우 A T/P의 인근모선인 A T/P, C S/S, J S/S에서의 증가된 전압강하량/100MW 값이 각각 0.01654, 0.00768로서 유사하며, 원격모선인 C S/S, F S/S, I S/S에서의 증가된 전압강하량/100MW 값이 각각 0.00886, 0.00650으로 유사함을 확인할 수 있다.

5.3 잔류자속 변화에 따른 전압강하 분석

다음 그림 12는 투입위상각이 45도, 부하가 middle인 경우 잔류자속이 클수록 전압강하량이 커짐을 그림 12를 통하여 확인할 수 있다. 이러한 경향은 모든 경우에 대하여 성립한다. 또한, 잔류자속의 변화에 따라 전압강하 정도의 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

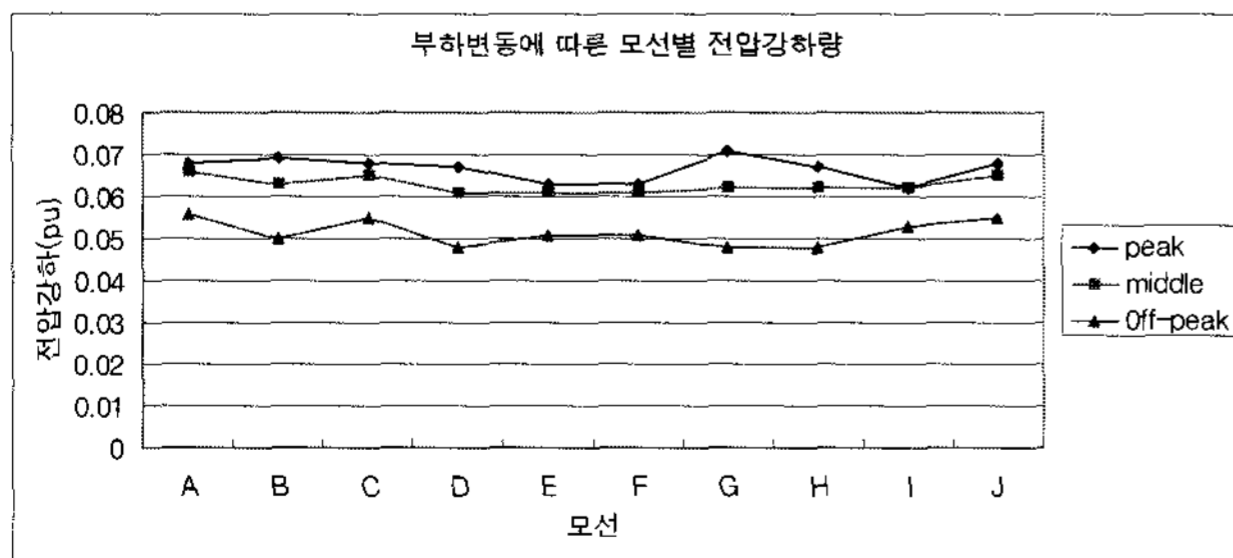


그림 10 투입위상각이 45°이고, 잔류자속이 15%인 경우 부하 변화에 따른 각 모선의 전압강하량

Fig. 10 The voltage drop of each bus according to the load when the closing point is 45° and the remnant flux is 15%

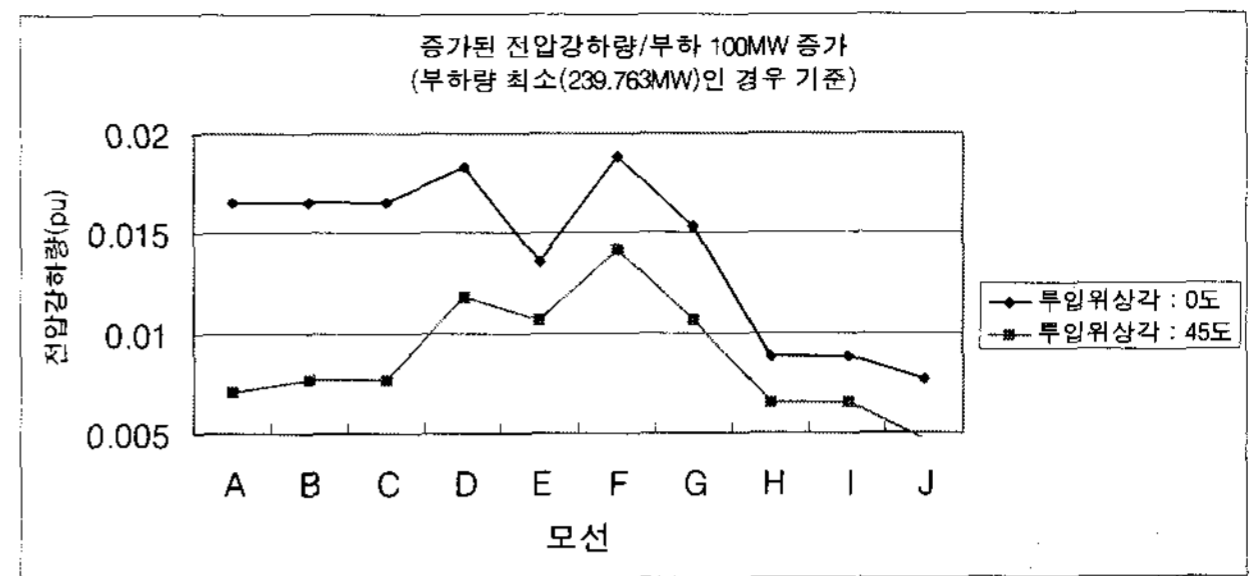


그림 11 부하량이 off-peak인 경우를 기준으로 부하 100MW 증가당 증가되는 전압강하량

Fig. 11 The increased voltage drop of per load based on voltage drop at load off-peak

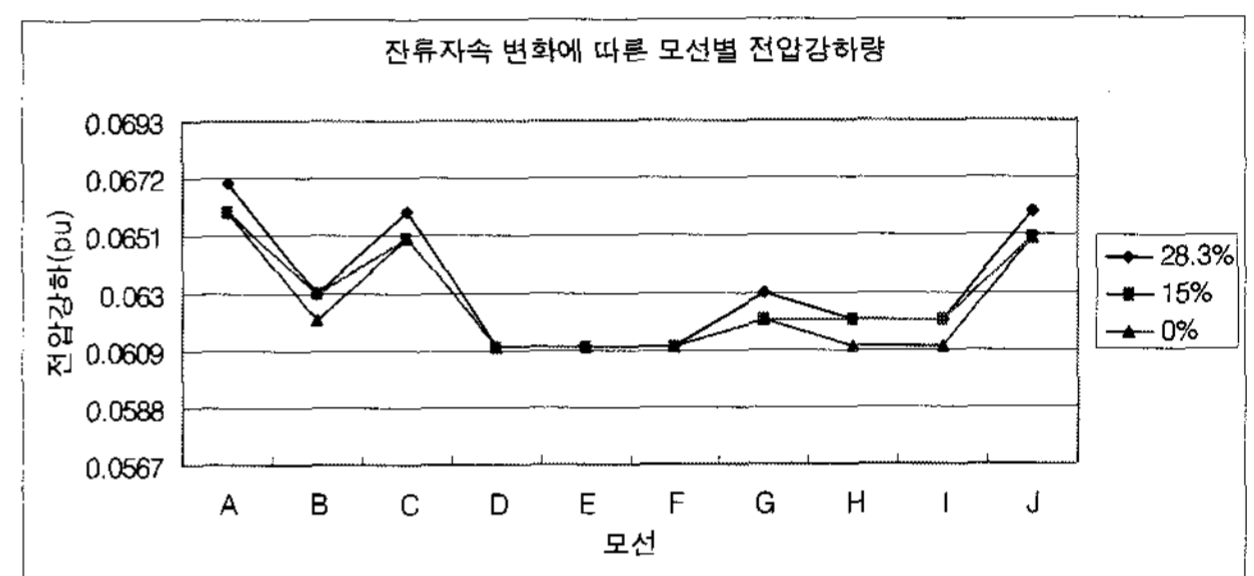


그림 12 투입위상각이 45°, 부하가 middle인 경우 잔류자속에 따른 전압강하량

Fig. 12 The voltage drop of each bus according to the remnant flux when the closing point is 45° and the load is at a middle value

6. 결 론

본 논문에서는 X 전력계통을 대상으로 여자돌입전류에 의한 전압강하를 분석하였다. A T/P의 주변압기의 시험 데이터를 이용하여 히스테리시스 특성을 모델링하였으며, 이를 전체 X 전력계통에 적용하여 다양한 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 실측치와의 비교 및 고조파 분석에 의하여 그 정확성을 증명하였다. 또한, 다양한 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 투입위상각이 0에 가까워짐에 따라, 잔류자속이 커짐에 따라, 부하량이 증가함에 따라, 여자돌입 전류는 커지고 따라서 전압강하 또한 커진다.
- ② 투입위상각>부하>잔류자속 순으로 전압강하에 미치는 영향이 크다.
- ③ 변압기 여자돌입 시 투입위상각의 변화에 따른 제주계통의 임의 모선에서의 전압강하는 근사식 (3)과 같다.
- ④ 부하의 변화에 따른 전압강하 정도는 투입위상각 및 A T/P로부터의 거리에 따라 많은 영향을 받는다.
- ⑤ 잔류자속의 변화에 따른 전압강하 정도의 변화는 거의 없다.
- ⑥ A T/P로부터의(여자돌입 발생지점으로부터의) 거리가 멀어질수록 전압강하는 작다.

참 고 문 헌

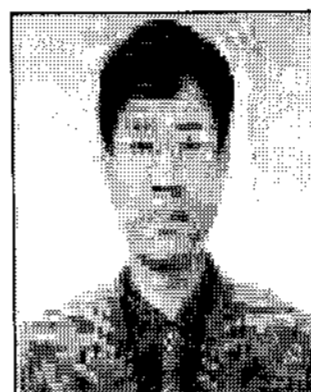
- [1] Mukesh Nagpal, Terrence G. Marinich, Ali Moshref, Kip Morison, and P. Kundur, "Assessing and Limiting Impact of Transformer Inrush Current on Power Quality", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, pp. 890-896, April 2006.
- [2] John H. Brunke, Klaus J. Fröhlich, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching-Part I: Theoretical Considerations", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 276-280, April 2001.
- [3] DCG-EMTP(Development coordination group of EMTP) Version EMTP-RV, Electromagnetic Transients Program. [Online]. Available : <http://www.emtp.com>
- [4] Sébastien Denetière, Jean Mahseredjian, Manuel Martinez, Michel Rioual, Alain Xémard, "On the implementation of a hysteretic reactor model in EMTP", International Conference on Power System Transients, 2003.
- [5] 서훈철, 여상민, 김철환, 유영식, 조범섭, "EMTP -RV 를 이용한 변압기 여자돌입전류 모델링", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007년 7월.
- [6] 서훈철, 여상민, 김철환, 유영식, 조범섭, "EMTP를 이용한 제주계통의 여자돌입전류 모델링", 2007년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 95-97, 2007년 11월.



김 철 환 (金 喆 換)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장

Tel : 031-290-7124  
 Fax : 031-290-7179  
 E-mail : hmwkim@hanmail.net



유 영 식 (柳 永 植)

1963년 2월 11일생. 1989년 광운대학교 전기공학과 졸업. 현재 한국전력거래소 계통보호팀 과장

Tel : 02-3456-6752  
 Fax : 02-3456-6757  
 E-mail : lyu21@kpx.or.kr



조 범 섭 (趙 範 燮)

1954년 8월 21일생. 1974년 조선대 이공대학 전기과 졸업. 2003년 조선대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력거래소 부처장, 천안지사장

Tel : 041-589-5800  
 Fax : 041-589-5809  
 E-mail : cbsf@kpx.or.kr

저 자 소 개



서 훈 철 (徐 熏 徹)

1982년 1월 19일생. 2004년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2006년 동 대학원 박사과정 입학. 현재 기초전력연구원 전력시스템연구실 연구원

Tel : 02-880-7587  
 Fax : 02-883-0827  
 E-mail : hunchul12@snu.ac.kr



여 상 민 (呂 相 敏)

1976년 7월 21일생. 1999년 성균관대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학). 2001년~현재 동 대학원 정보통신공학부 박사과정

Tel : 031-290-7166  
 Fax : 031-290-7955  
 E-mail : harc@chollian.net