Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 14, No.3, pp. 22~28 May 2000 [논문 : 14-3-4]

PTW를 이용한 산업용 수변전계통의 운영방안

(PTW Application Method for Analysis the Industrial Distribution System)

설용태* · 이의용** · 이배희***

(Yong-Tae Sul · Eui-Yong Lee · Bae-Hee Lee)

요 약

본 논문에서는 산업용 수변전 계통의 전기적 특성을 PTW(Power Tools for Windows)를 이용하여 종합적으로 분석하기 위한 기법을 제시했다. 케이블의 정·영상 임피던스는 T&D(Transmission and Distribution)와 BICC규정 등을 수변전설비에 적합하게 수정 적용하였고, 변압기의 X/R 자료는 IEEE 표준자료를 이용하였다. 이러한 기법은 실제 운전 중인 2개의 공장을 모델로 전력조류계산, 고장계산 및 과부하시 전동기의 과도특성 등을 분석하여 그 효율성을 입증하였다.

Abstract

In this paper PTW(Power Tools for Windows) application method for analysis the industrial distribution system is proposed. T&D(Transmission and Distribution) and BICC methods is applied for the cable impedance and the X/R of transformer data is estimated by IEEE standard. The effectiveness of this method was improved by the electrical characteristics analysis of the real industrial distribution system.

1. 서 론

최근 산업사회가 정보화·첨단화되면서 각종 전기설비들이 전압, 주파수 변동에 민감해 짐에 따라서 높은 공급신뢰도와 함께 전기의 품질에 대한 중요성이 강조되고 있다. 이를 위해서 변전소 종합감시제어시스템과 디지털 보호계전기 등의 보호제어설비에 대한 연구개발이 지속되고, 발전기·변압기 등 전력설비의 품질도 향상되어 발·송전 계통의 신뢰성은 높아졌다. 그러나 아직도 전압·주파수의 불균일에 따른 전기의 품질이 문제가 되고 있는데, 배전계통과 수변전 계통의 운용상의 문제도 주요 원인이 되고 있다. 즉, 배전계통은 송전계통과 달리 구성과 특성이 복잡 다양하여 정확한 해석과 종합적인 운용관리에는 한계가 있으며, 산업용 수변전 계통 역시 체계적인 특성분석과 운용관리가 어려운 실정이다. 특히 대규모 산업용 공장의 경우 어느 부분의 저전압 현상의 요인과 계통의 취약부분 및 과부하 등에 의한 전동기 부하의 과도특성 해석 등을 위한 체계적인 분석이 필요하다. 현재 산업용 수변전 계통 해석에는 PTW, ETAP 등이 이용되고 있는데, 이러한 Tool은 각종 설비의 상세한 입력자료가 필요하다. 그러나 실제 운용중인 공장의 경우 케이블, 변압기, 전동기 등에 대한 임피던스, X/R 등 입력 자료가 충분치 않아 정확하고 다양한 분석에는 한계가 있다[1,7].

본 연구에서는 PTW를 이용하여 산업용 수변전 계통의 전기적 특성을 정밀하고 다양하게 분석하는 기법을 제시하였다. 먼저 케이블의 정·역상 임피던

* 정회원 : 호서대학교 전기공학부 교수
** 정회원 . 호서대학교 대학원 전기공학부 박사과정
*** 정회원 . 일진전선 연구원
접수일자 : 1999년 12월 10일

스를 기존의 T&D, BICC규정 등을 이용하여 구하고 계통의 전력조류와 고장특성 등을 분석하였다. 또한 일부 미진한 변압기의 %Z는 IEEE 표준을 이용하였고, 유도전동기 부하의 초기 과도 리액턴스 등의 입력자료는 ANSI의 자료를 통해 구하였다. 2개의 실제 공장을 모델로 선정하여 전력조류, 고장계산 및 전동기의 과부하 특성 등을 구하여 산업용 수변전계통을 종합적으로 다양하게 분석하였다.

2. 계통 구성요소의 입력데이터

산업용 수변전 계통의 전기적 특성 분석을 위한 조류계산과 고장계산을 위해서는 케이블, 변압기, 전동기부하 등에 대한 각종 데이터가 필요하다. 그러나 운용중인 실제 공장에서는 정상 · 영상분 임피던스와 X/R 값 등의 자료가 미흡하여 다음과 같은 과정으로 계통 구성요소의 입력자료를 구하였다.

2.1 케이블의 임피던스

케이블의 임피던스는 미국 WH사의 송배전 규격(T&D)와 영국의 케이블 관련 규정인 BICC 등 일반적으로 이용하여 구한다[2,3]. 본 연구에서는 T&D 규정을 산업용 수변전계통의 케이블에 적용하기 위해서 접지방식과 단위계의 변환 등을 고려하고, 도체와 시스 사이의 유도 리액턴스는 BICC 규정을 이용하여 정 · 역상 임피던스를 아래와 같은 과정으로 구하였다.

가. 정상분 임피던스

케이블의 정상분 임피던스 Z_1은

$$Z_1 = R + jX[\Omega/Km] \quad (1)$$

이며, 저항성분 R은 다음과 같다.

$$R = R_C + \frac{X_m^2 \times R_S}{R_S^2 + X_m^2} \quad (2)$$

여기서 R_C는 교류도체의 실효저항, R_S는 시스저항, X_m은 도체와 시스 사이의 유도 리액턴스로서[3]

$$X_m = 4\pi f \times \ln\left(\frac{2 \times S_1}{D_{S1}}\right) \times 10^{-4} \quad (3)$$

와 같고, S_1은 도체의 중심간격, D_{S1}은 시스 평균직경이다. 또한 리액턴스 성분 X는

$$X = 4\pi f \times \ln\left(2 \times \frac{GMD_{3C}}{GMR_{1C}}\right) \times 10^{-4} - \frac{X_m^3}{X_m^2 + R_S^2} \quad (4)$$

이며, f는 주파수, GMD_{3C}는 3심 도체간의 기하학적 평균거리, GMR_{1C}는 1심 도체의 기하학적 평균반경이다.

나. 영상분 임피던스

영상분 임피던스 Z_0는

$$Z_0 = Z_C - \frac{Z_m^2}{Z_s}[\Omega/Km] \quad (5)$$

와 같고, Z_C는 도체의 대지 귀로 임피던스, Z_S는 시스의 대지 귀로 임피던스, Z_m은 도체와 시스의 대지 귀로 상호 임피던스로서 각각 다음과 같이 된다.

a. 도체의 영상분 임피던스

$$Z_C = R_c + R_e + j(3 \times 4\pi f \times \ln\left(\frac{D_e}{GMR_{3C}}\right)) \times 10^{-4} \quad (6)$$

여기서 Re는 등가대지저항이며, De는 대지귀로 등가깊이, GMR_{3C}는 3심 도체의 기하학적 평균반경이다.

b. 시스의 영상분 임피던스

$$Z_S = R_S + R_e + j(3 \times 4\pi f \times \ln\left(\frac{D_e}{GMR_{3S}}\right)) \times 10^{-4} \quad (7)$$

여기서 GMR_{3C}는 3심 시스의 기하학적 평균반경이다.

c. 도체와 시스간 상호임피던스

$$Z_m = R_e + j(3 \times 4\pi f \times \ln\left(\frac{D_e}{GMD_{3C-3S}}\right)) \times 10^{-4} \quad (8)$$

$$GMS_{3C-3S} = GMR_{3S}$$

2.2 변압기의 입력데이터

시스템 해석을 위한 변압기의 데이터는 용량, 결선상태, 1차측과 2차측 전압, 임피던스 등이 요구된다. 이중에서 임피던스에 대한 자료가 없는 경우는 설계제작회사에 의뢰하거나, 불가능한 경우는 그림 1

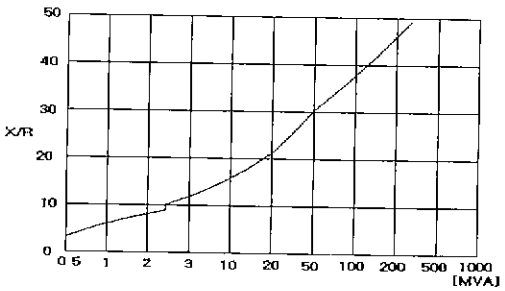


그림 1. 변압기 용량에 따른 X/R 비율
Fig. 1. X/R ratio of transformer size

과 같은 IEEE 표준 방식 등을 이용하여 구하였다[4].

2.3 부하 모델

일반적으로 부하는 크게 전동력부하와 전등부하로 구성되며 산업용 부하는 전동기가 큰 비중을 차지한다. 공장의 전동기 부하는 대부분 유도전동기이며, 특수한 직류전동기와 같은 경우는 동기기나 유도기로 근사화하여 고려할 수 있다. 일반적인 3상 유도전동기의 등가회로는 그림 2와 같다[5].

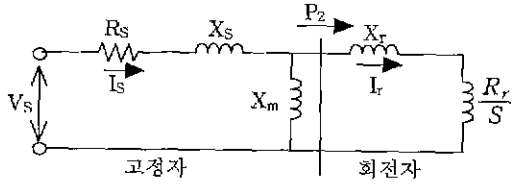


그림 2. 3상 유도 전동기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of a three phase induction motor

2차출력 P는

$$P = P_2 - P_{2C} \quad (9)$$
$$= \frac{R_r}{S} I_r^2 - R_r I_r^2$$
$$= R_r \frac{1-S}{S} I_r^2$$

여기서 P_2, P_{C2}는 각각 2차 입력과 동손으로

$$P_2 = \frac{R_r}{S} I_r^2 \quad (10)$$

$$P_{2C} = R_r I_r^2 \quad (11)$$

이고, R_r, I_r, S는 각각 2차측 저항, 전류, 슬립이며, 효율은 다음과 같은 슬립의 함수로 표시된다.

$$\eta = \frac{P}{P_2} \times 100 = (1-S) \times 100[\%] \quad (12)$$

전등부하는 용량, 효율, 역률 등의 입력자료가 요구되는데, 용량은 전력량과 전류로 구성되며, 전력량은 월 평균전력량을 시간당 전력량으로 환산하여 적용하였다. 이러한 부하는 크게 식 (13)~(15)와 같이 일정전력모델, 일정임피던스모델, 일정전류모델 등 3가지 형태로 나타낼 수 있다[5].

$$P(V,f) = P_o(aV^2 + bV + c)(1 + g\triangle f)$$
$$Q(V,f) = Q_o(dV^2 + eV + f)(1 + \triangle f) \quad (13)$$

단, $a \sim g$: 부하용답계수
$\triangle f$: 주파수편차

$$Z_S = R_S + jX_S = \frac{V^2}{S_L}(\cos\theta + j\sin\theta) \quad (14)$$

단, $\theta = \tan^{-1}\frac{X_S}{R_S}$

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} = I\angle\theta - \phi \quad (15)$$

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

3. 사례연구

3.1 모델계통

모델계통으로는 실제 운전중인 수전용량 4,500[kVA], 전압 22.9[kV]의 알루미늄공장과 수전용량 20[MVA], 수전전압 154[kV]인 시멘트공장의 일부를 선정하였다. 알루미늄공장은 변압기 9대와 압연을 위한 두 대의 500[kW] 직류전동기 등 총 2,480[kW]의 전동력부하와 90[kW]의 전등부하로 구성되어 있으며, 이를 각 부하별로 축약한 단선도는 그림 3과 같다. 또한 전동기부하의 특성을 분석하기 위해 용량 350[hp]의 전동기 두 대로 구성되어 Mill을 회전시켜 원료를 분해하는 시멘트 공장의 일부를 채택하였다. 분석Tool은 수변전특성 전문해석 S/W인 PTW(Power Tools for Windows)중에서 DAPPER, A_FAULT 및 I*SIM 등을 이용하였다[6].

PTW S/W를 이용하여 수변전 계통을 해석하기 위해서는 케이블, 변압기 및 전동기 등 각종 구성설비에 대한 입력데이터가 요구된다. 그러나 실제 운용중인 공장의 경우 이러한 입력데이터가 부족하여 정확한 해석에는 한계가 있는데, 특히 케이블의 임피던스와 같은 자료는 전혀 없어 PTW S/W를 적용하기가 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 미진한 데이터들을 2절의 방법을 이용하여 추정하였다. 먼저 케이블 임피던스는 케이블의 규격별로 Rc, Rs등 각 변수값을 JIS규격표를 이용하여 구한 후 식 (1)~(8)에 대입하여 영상분과 정상분 임피던스를 계산하였으며, 이 결과는 표 1과 같다. 변압기의 경우 필요한 입력데이터는 용량, 결선상태, 탭전압 및 %Z 값 등인데, 표 2의 변압기들 중에서 용량이 2,100, 250[kVA]의 %Z를 제외한 나머지 입력자료는 제작사로부터 구할

수 있었으며, 미지량은 실제 공장에서 근사화법으로 이용되는 그림 1의 IEEE 표준방식을 이용하였다.

표 1. 케이블 임피던스
Table 1. Cable impedance data

규격	임피던스[Ω/km]	
	정상분	영상분
600V 325 SQ	0.0758+j0.1169	0.2538+j2 3049
3,300V 50 SQ	0 4889+j0.1620	1.3925+j2.0307
3,300V 200 SQ	0.1224+j0.1322	1.1696+j1.6642
22,900V 250 SQ	0.1242+j0.1513	0.3047+j0.0978
6,600V 3C×60 SQ	0.3944+j0.1597	1.3164+j1.9995
6,600V 250 SQ	0.0961+j0.1408	1.1433+j1.6742

표 2. 변압기 용량별 %Z
Table 2. Transformer %Z data

변압기 용량[kVA]	%저항	%리액턴스
4,500	0.8092	6.9530
2,100	0.7900	6.9459
1,800	0.7850	5.8200
1,100	0.7845	3.9223
1,000	0.6900	3.8400
250	0.3740	3.2600

전동기에 관련된 입력데이터는 (1) 전압, 정격용량, 역률, 효율 및 극수 (2) 초기 과도 리액턴스와 X/R (3) 부하모델 형태 등 3종류가 요구된다. 모델계통의 대부분 전동기의 경우 (1)항의 자료는 제작사로부터 구할 수 있었으나 (2)항의 초기 과도 리액터스 Xd'' 와 X/R등은 미지량으로 PTW내의 ANSI자료를 이용하여 추정하였다. (3)항의 부하모델형태는 부하종류와 용량이 주어지면 PTW의 Bench Mark 모델에 의해서 식 (13)~(15) 표현된 저항, 리액턴스 등의 값을 알 수 있다. 따라서 외부에서 별도의 입력자료 없이 각 부하모델별로 전류특성 등의 분석이 가능하다.

표 3. 전동기 입력데이터
Table 3. Motor input data

전압	용량	역률	효율	극수	X_d''	X/R
6.6[kV]	350[hp]	0.96	0.97	2극	0.17	10

3.2 결과분석

그림 3의 실제 공장의 정상상태와 고장상태를 분석하기 위해 표 1~3의 입력자료를 이용하여 PTW로 전력조류계산과 고장계산을 수행한 결과는 각각 그림 4, 5와 같다. 그림 4는 모델계통의 일부분에 대한 전력조류계산 결과로서 정상상태에서 인입부로부터 각 모선, 지점 및 최종 말단부하까지의 전기적 특성을 상세히 나타낸다. 이를 이용하면 한개나 수개의 배전반 계기 측정에 따른 대략적인 운영관리에 비해서 보다 정확하고 종합적인 계통특성 분석이 가능해진다.

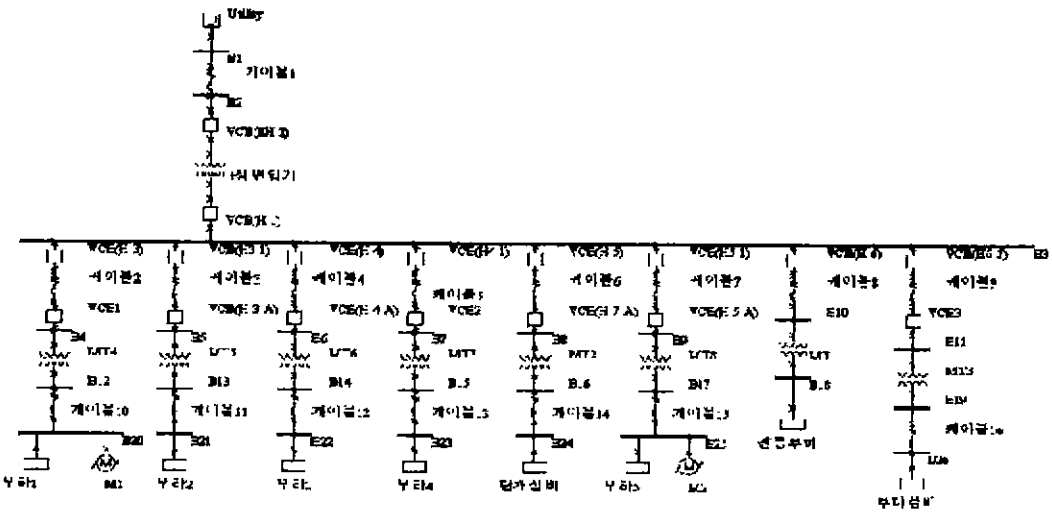


그림 3. 공장의 전체 계통도
Fig. 3. Single line diagram of model system

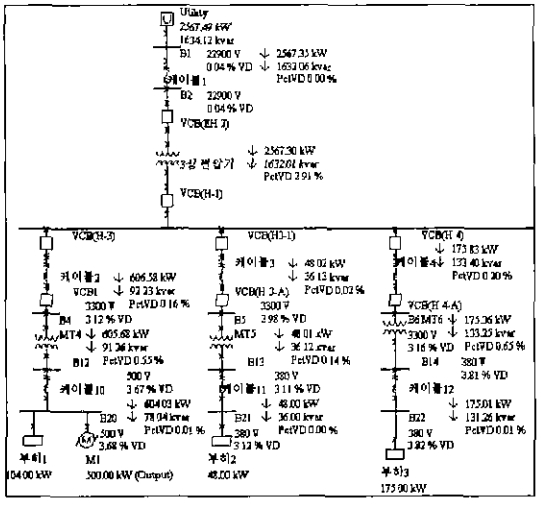


그림 4. 일부 계통의 전력조류 결과
Fig. 4. Load flow diagram

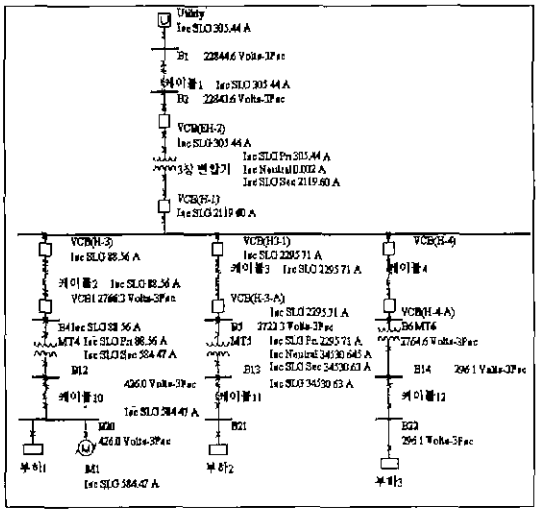


그림 5. 모선 13에서 1선 지락고장 결과
Fig. 5. Single line to ground fault result at bus 13

예를 들면 인입부로 부터 최종 부하 말단까지의 전압강하가 어느 정도인지를 살펴보면, 모선 B20에 연결된 전동기는 3.68[%], 모선 B21의 부하는 3.12[%], 부하 3은 3.82[%]로서 어느 지점의 전압강하가 더 심한지를 알 수 있다. 이러한 결과는 측정 가능한 지점에서의 전압, 전력 등의 실측치와 비교한 결과 오차가 3~5[%]이내로서 정확성이 검증되었다. 그림 5는 모선 13에서 1선 지락고장이 발생한 경우의 단락전류와 인근 부하에 미치는 영향 등을 보여준다. 모선 B13의 1선 지락전류는 34,530.63[A]이며, 인입모선 B1의 전압은 정상상태의 22.9[kV]에서 22.8446[kV]로 강하하고, 인접 모선인 B5의 경우 정상상태의 3,300[V]에 비해서 2,722[V]로 낮아짐을 알 수 있다. 인접 모선 B20의 전동기 부하는 정상상태의 500[V]에 비해서 426[V]로 부하 3이 연결된 모선 B22의 전압은 380[V]에서 296.1[V]로 강하함을 보였다. 이러한 분석을 통해서 어느 지점의 고장이 계통내의 다른 지점에 어떻게 영향을 미치는지를 정확히 알 수 있고, 기존 차단기의 단락용량과 각종 보호계전기의 적절성 등에 대한 종합적인 정보를 얻을 수 있다.

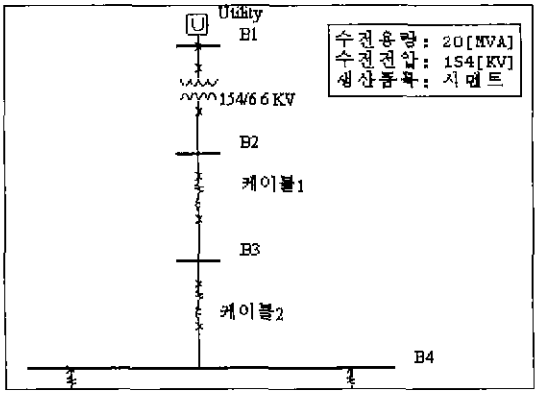


그림 6. 모델공장의 일부 계통
Fig. 6. Milling area of model system

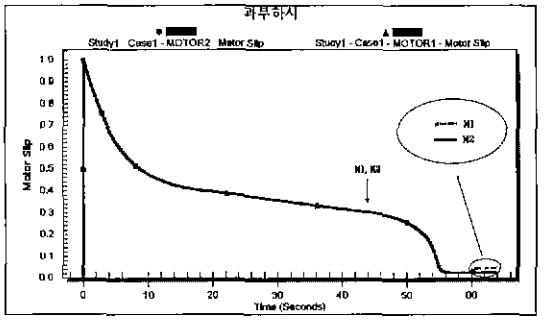
전동기의 과도특성을 분석하기 위해서 그림 6과 같이 수전용량 20[MVA], 수전전압 154[kV]이고 6.6[kV]의 전동기 2대로 Mill을 회전시켜 시멘트의 원료를 분쇄하는 시멘트공장을 모델로 선정하였다. 표 4는 전동기의 부하모델에 따른 각 모선사이의 전류변화를 나타낸 것으로서, 부하모델별로 값의 차이가 크지는 않다. 실제 현장의 데이터와 비교하면 각 모선에서의 부하형태에 따른 전압강하 변화는 차이가 없으며, 전류의 흐름이나 무효전력을 비교하여 보았을 때 일정 임피던스 모델이 가장 근사한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 임피던스 부하 모델의 경우 역률에 따라서 그 정확도가 달라지는데, 역

률이 0.9, 0.85인 경우는 역률이 1인 경우에 비해서 모선간 전류값의 정확도가 5%, 11.16%정도 낮아짐을 보였다. 따라서 역률 변화가 심한 경우나 낮은 역률로 운전하는 전동기 부하의 경우는 임피던스 부하 모델의 정확성이 문제가 될 수 있다.

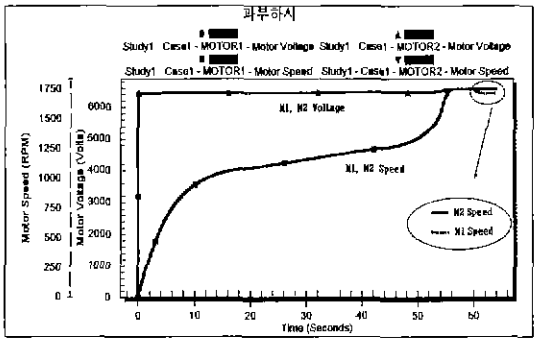
표 4. 부하 형태에 따른 전류 값
Table 4. Current values as to load model

모선번호	실측치 [A]	부하모델		
		일정전류	일정전력	일정임피던스
2-3	50	48.97	49.06	49.14
3-4	50	48.97	49.06	49.14
4-5	25	24.49	24.53	24.57
4-6	25	24.49	24.53	24.57

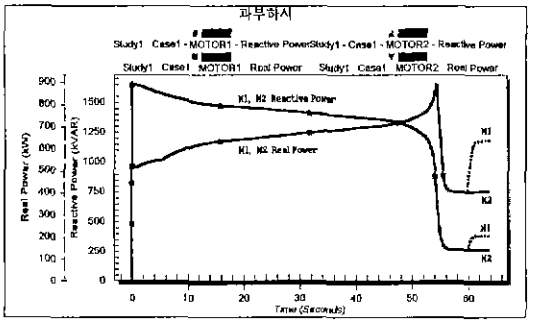
6.6[kV] 전동기 1에 60초 후 20%정도의 과부하가 걸린 경우의 슬립, 속도, 전압 및 전력특성은 그림 7과 같다. 그림 7에서 보면 과부하시 전동기 1의 슬립은 0.0471로서 정상상태의 0.0259에서 비해서 약 45[%]정도 증가함을 보였으며, 회전속도는 1,716[rpm]



(a)



(b)



(c)

그림 7. 20% 과부하시 전동기의 과도특성
(a) 슬립 (b) 속도/전압 (c) 유효/무효전력
Fig. 7. Transient motor characteristics at 20% overload (a) Slip (b) RPM/Voltage (c) kW/kVAR

으로 정상상태의 1,754[rpm]보다 약 2.2[%] 감소하였다. 또한 전동기 1의 유효전력과 무효전력은 각각 635[kW], 380[kVAR]로 증가함을 보였으며, 전동기 2는 정상상태의 404[kW], 260[kVAR]에서 정상상태와 동일한 특성을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 PTW를 이용하여 산업용 수변전 계통의 전기적 특성을 다양하고 정밀하게 분석하는 기법을 제시하였다. PTW에 필요한 케이블의 정·영상 임피던스, 변압기 및 전동기 등 데이터는 T&D, BICC, ANSI 및 IEEE 표준자료 등을 이용하여 구하였다. 이러한 기법은 실제 운용중인 공장을 모델계통으로 선정하여 전력조류와 고장계산 등을 통해서 수변전 계통의 각 모선, 부하 등에서의 전압강하, 단락전류 및 전력의 흐름 등을 상세히 구할 수 있었으며 실측자료와 근사함을 확인하였다. 이는 기존의 수배전반의 대략적인 측정값에 의한 계통운용방법 보다 종합적인 분석과 운용이 가능함으로써 전기의 품질에 대한 원인분석과 취약 부분에 대한 보호, 제어장치의 보완 등의 보다 효율적인 산업용 수변전 계통의 운용계획 수립에 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 호서대학교 SERC의 지원에 의하여 이루어졌음.

참 고 문 헌

[1] Douglas S. Dorr, "Power System Quality Study 1990 to 1995 Initial Results", Applied Power Electronics Conference, pp. 303-308, 1992.
[2] The westinghouse electric corporation, "Electrical transmission and distribution reference book", 1984.
[3] BICC "Electric Cables Handbook, " 1985.
[4] IEEE Standard C37.101, 1979.
[5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", pp. 289-292, 1994.
[6] SKM Systems Analysis Inc, "DAPPER · TMS reference manual", 1998.
[7] Industrial and Commercial Power Systems Technical, IEEE, 1992.
[8] Computational Intelligence Applications to Power Systems, song, 1996.

◇저자소개◇

설 용 태(偰龍泰)
1958년 8월 4일생 1979년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 호서대학교 전기공학부 교수.

이 의 용(李懿鏞)
1967년 7월 17일생. 1991년 순천향대학교 전기공학과 졸업. 1993년 호서대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

이 배 희(李裵熙)
1972년 7월 15일생. 1998년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 일진전선 연구원.