

# 誘導負荷가 電力系統 負荷母線의 電壓에 미치는 影響

(The Influence of Inductive Loads on the Power System Voltage)\*

趙揚行\*·鄭在吉\*\*

(Yang-Haeng Cho · Jai-Kil Jung)

## 요 약

최근의 전력계통은 대규모 복잡화 되어가고 장거리 대용량 송전이 증대함에 따라 안정도 해석에서 부하특성을 고려한 해석은 중요한 과제이다.

본 논문은 전력계통의 유도부하가 전력계통의 전압에 미치는 영향을 조사 분석한 논문으로 그 주요내용은 부하모선에 연결된 부하중에서 유도 전동기 부하의 비율이 크거나 유도전동기 부하의 관성정수가 적은 경우가 전압 불안정 현상에 미치는 영향이 크며, 유도전동기 부하가 클 경우는 그 부하가 연결된 회로의 일부 개로시 즉 단순한 계통의 회로 변경시에도 전압불안정 현상을 일으킬 수 있다. 이 전압 불안정 현상은 부하의 응답특성에 따라 계통에 적정용량의 전력용 콘덴서를 투입함으로써 방지할 수 있다.

## Abstract

Along with the recent trend of complexity and long distance transmission in power system, dynamic analysis of stability considering the load characteristics is an important subject. In this paper, the influence of the induction motor loads on the power system voltage is investigated.

The influence of the inductive load ratio and the inertia of induction motor on the voltage response of the power system are examined, and in the case of the high percentage of the induction motor load, induction motors in the power system can lead to transient voltage instability even under the system condition such as switching operation.

The application of static condenser(SC) to prevent the transient voltage instability is introduced.

## 1. 서 론

전력수요의 신장과 이에 따른 전원개발로 계통 규모는 해마다 커지고 있다. 이와 더불어 신규전원은 용지, 환경문제 때문에 수요지로부터 원격화되고 동시에 한정된 지점에 집중해서 개발되는

경향이 있다. 이 때문에 송전선은 장거리로 되어 이른바 안정도가 저하하는 한편 계통 규모확대에 따른 기술적 제문제가 일부 전력계통에서 대두되고 있다.

최근에는 전력계통해석에서 전압 안정성에 관해 중요성이 인식되어 여러 방면에서 많은 연구가 진행되고 있다. 전압 불안정 현상은 본질적으로 전력계통 부하의 요구전력을 공급할 수 없는 경우에 전압이 급격히 저하하는 것으로 전압 붕괴라 표현되는 현상이다. 일반적으로 이들 불안

\* 正會員 : 포스코 엔지니어링(주), 工博

\*\* 正會員 : 中央大學校 電氣工學科 教授, 工博

接受日字 : 1994年 4月 14日

정은 수용가에 전력공급을 못하게 된다. 즉 계통 불안정으로 보호회전기의 동작과 제어기의 기능 저해, 전력동요로 발전기나 송전선로가 차단되기 때문이다.<sup>5), 6)</sup>

본 논문에서는 전력계통의 특성중 유도부하가 전압불안정에 가장 심하게 영향을 미치는 각종 요인을 분석하고자 한다.

전압불안정 현상을 막을 수 있는 방법으로서 계통에 전력용 콘덴서를 부하의 응동에 따라 적정 용량을 투입하는 방법에 관하여 조사하였으며 자동투입 콘덴서를 모의하여 전압 불안정 현상을 줄일 수 있는 방법에 대하여 재확인한다.

전력계통의 안정도해석에서 미분방정식으로 표현되는 동요방정식의 해법으로는 계산속도면에서 우수한 제형적분법(Trapezoidal Method)을 사용하여 해석의 정밀도를 기하였고, 동특성 해석을 위한 조류계산방법으로는 정상운전시 초기 계산에는 뉴턴-랩슨방법을 사용하고 과도시의 조류계산에는 모션 어드미턴스행렬 삼각화 분해법을 이용하였다.<sup>3)</sup>

## 2. 유도부하를 고려한 전력계통 모델링과 해석방법

### 2.1 해석 기본식

전력계통 동특성을 표현하는 방정식은 회전기와 그 제어회로의 동작상태를 나타내는 미분방정식과 전력계통 구성을 나타내는 방정식으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{X}(t) = F(X(t), Y(t)) \quad (2.1)$$

$$0 = G(X(t), Y(t)) \quad (2.2)$$

단,  $X(t)$  : 상태벡터, 초기치  $X(t_0) = X_0$

$Y(t)$  : 계통전압벡터

식 (2.1), (2.2)는 시간의 함수로서 동시에 해가 구해져야 한다. 상기 방정식의 해법으로는 상태변수의 초기치  $X_0$ 를 구하고 식(2.2)로 부터 고장시 회로망방정식을 풀어서  $Y(t)$ 를 계산한 다음, 식(2.1)에서 수치적분을 행하며  $X(t)$ 를 구하는 순서를 취하면서 식(2.2)와 (2.1)의 해를 교대로 구하여 회전자의 동요곡선(Swing Curve)을 구한다.

## 2.2 모델링

안정도 해석에 있어서 계산법과 전력계통에 포함되어 있는 기기 및 제어계의 모델화가 중요하므로, 그 표현방법이 계산정도에 미치는 영향은 크다.

### 2.2.1 동기 발전기

안정도해석에 디지털계산기가 사용되기 이전에는 발전기의 과도 리액턴스  $X'_d$  배후전압은 일정하다고 본 간이 모델이 사용되어 왔다. 고장후의 제1과 동요(과도영역)에 대하여서는 이 방법이 어느 정도 근사치가 기대되지만 최근 문제되고 있는 중간영역 이후의 안정도에 대하여서는 상세한 모델이 필요하다.

이러한 안정도 해석에서 동기발전기는 회전자에 복수의 제동권선을 갖는 PARK의 기본식에 의한 상세 모델이 사용되고 있다.

PARK의 기본식은 회전자회로에 관하여 d축에 계자 권선 및 하나의 제동권선, q축에 2종류의 제동권선을 고려한 방정식으로 발전기 회전자축의 각 권선에 대한 쇄교자속을 전기자축으로 환산하여 나타내면 식 (2.3), 식 (2.4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_d & 0 \\ 0 & X_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{aq} & X_{aq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{kd} \\ I_{fq} \\ I_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{fd} \\ \phi_{kd} \\ \phi_{fq} \\ \phi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ffd} & X_{ad} & 0 & 0 \\ X_{ad} & X_{kkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{ffq} & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_{aq} & X_{kkq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{kd} \\ I_{fq} \\ I_{kq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 \\ 0 & X_{aq} \\ 0 & X_{aq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서,  $X_d = X_{ad} + X_L$ ,  $X_q = X_{aq} + X_L$ ,  $X_{fd} = X_{ad} + X_{kd}$ ,  $X_{kkd} = X_{ad} + X_{kd}$

$X_{ad}$  : 전기자 권선과 계자 권선, 제동권선간의 상호리액턴스

$X_L$  : 전기자 누설 리액턴스,  $X_{fd}$  : 계자회로 누설 리액턴스

d, q축 전기자 및 회전자 회로 전압 방정식은 식 (2.5), 식 (2.6)과 같으며,

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} - R_a \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\phi_q \\ \phi_d \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} E_{fd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{fd} \\ \phi_{kd} \\ \phi_{kq} \\ \phi_{kk} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{kq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{kd} \\ I_{kq} \\ I_{kk} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

과도시 전압방정식은 식(2.7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} -\phi_q'' \\ \phi_d'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & -X_q'' \\ \omega X_d'' & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

PARK식으로 나타낸 각 수식은 발전기의 좌표계로 표현되었으므로 이를 회로망과 결합할 때에는 회로망의 좌표계로 변환할 필요가 있다. 이때 전류에 대한 변환식은 식(2.8)을 이용한다.

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\delta & \cos\delta \\ -\cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

여기서,  $\delta$ 는 실수축R과 Q축간의 상차각

터어빈에서 발전기 회전자에 가해지는 기계적 인 입력을  $P_m(w)$ 발전기의 전기적 출력을  $P_e(w)$ 라 하고, 발전기의 계동권선에 해당하는 계동토크( $P_d$ : 계동토크전력)를 감안하면 발전기의 운동 방정식은 식(2.9)이 된다.

$$\frac{M}{\omega_n} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_n} \frac{d\delta}{dt} + P_e = P_m \quad (2.9)$$

### 2.2.2 제어기

발전계통은 전력을 발생시키는 발전기와 발전기를 구동하기 위하여 기계적 토크를 제공하는 원동기로 구성되고 각 설비는 전압제어용 여자기(Exciter)계와 속도제어용 조속기(Governor)계에 의하여 제어된다.

본 논문에서는 전력 계통의 전압 불안정 현상에 대하여 1sec정도간에 걸쳐 시뮬레이션하였으므로 제어기에 관한 모델링은 적용하지 않았다.

### 2.2.3 부하

안정도 계산시 부하에 대한 계산은 전압특성 및 주파수특성과 관련하여 계산기에 의하여 정밀모의가 가능해졌고, 부하특성으로 인한 계통 동요의 계동에 대한 영향을 무시할 수 없으며, 장

시간에 걸친 현상해석의 필요성등으로 인하여 그 중요성이 증가하고 있다. 부하의 전압특성, 주파수 특성이 안정도에 미치는 영향은 조건에 따라 다르며 일반적 경향을 파악하는 것은 어렵지만 발전기에 일정부하가 있으면 전력동요 억제효과가 있고, 한편 부하가 전압과 같이 변화하면 외란 중의 전압변화가 적어 부하가 전압유지에 기여하여 안정도가 증가하는 경우도 있다. 특히 무효전력 부하가 전압에 의해 크게 변화되면 전압을 매개로 하여 간접적으로 유효전력 부하도 변화된다.

### 2.2.4 유도 전동기

전력계통의 안정도 해석에서 계통에 연결된 부하는 대부분 병렬 임피던스인 정지(Static)임피던스로 취급된다.

그러나 모든 부하는 병렬 임피던스와 같은 특성을 갖고 있지 않으므로 계통 전압이나 주파수 변화에 대한 유효, 무효 전력의 변화를 고려한 부하 모델링을 하여야 하며 유도기의 경우는 부하관성을 고려할 필요가 있다.

유도전동기에서 2차저항( $R_2$ )은 리액턴스에 비하여 적기 때문에 동기 및 과도 리액턴스 계산시에는 무시하며 정상상태 등가 회로에서 개로 리액턴스 X(동기기에서는 동기 리액턴스)는 식(2.10)로 된다.

$$X = X_1 + X_m \quad (2.10)$$

같은 방법으로 회전자의 폐로 리액턴스(과도 리액턴스)  $X'$ 는 식(2.11)과 같으며

$$X' = X_1 + \frac{X_2 X_m}{X_2 + X_m} \quad (2.11)$$

유도전동기의 회전자에 대해서  $R_2$ 를 무시하고, 과도 리액턴스  $X'$ 의 배후 전압( $E'$ )의 변화를 미분방정식으로 표현하면 식(2.12)과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_R' \\ E_I' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0'} & \omega_s - \omega_r \\ -\omega_s + \omega_r & -\frac{1}{T_0'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R' \\ E_I' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{X - X'}{T_0'} \\ \frac{X - X'}{T_0'} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{IR} \\ I_{II} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

식(2.12)에서  $\omega_s, \omega_r$ 은 각각 동기 각속도, 회전자 각속도를 나타낸다. 회전자의 개로 시정수  $T_0'$ 는

식 (2.13)과 같다.

$$T_0' = \frac{X_2 + X_m}{2\pi f_0 R_2} \quad (2.13)$$

이 때 유도전동기 고정자에 관한 방정식은 식 (2.14)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_1 - E' = (R_1 + jX') I_1 \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_R' \\ E_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & -X' \\ X' & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1R} \\ I_{1I} \end{bmatrix}$$

유도전동기의 운동방정식은  $P_{mM}$ 을 전동기 출력,  $P_{eM}$ 은 전동기 입력,  $M$ 을 관성정수라 할 때 다음 식으로 표현된다.

$$M \cdot \frac{dS_p}{dt} + P_{eM} = P_{mM} \quad (2.15)$$

부하 토오크인  $P_{mM}$ 은 속도-토크 곡선에서 구할 수 있다. 즉, 그림 2.1과 같이 슬립  $S_p$ 와 부하토크 사이의 특성 곡선에서

$P_{mM}(S_p, P_{mMi})$ 는  $i$ 를 1에서  $n(\max=10)$ 으로 지정하고 각점을 직선으로 근사화하여 구한다. 즉,  $S_{pi} \leq S_p < S_{p(i+1)}$ 에서는 식 (2.16)를 이용하여 계산한다.

$$P_{mM}(S_p) = \frac{P_{mMi+1} - P_{mMi}}{S_{p(i+1)} - S_{pi}} (S_p - S_{pi}) + P_{mMi} \quad (2.16)$$

### 2.3 해석 알고리즘

본 장에서는 동기기, 유도기 모델링에서 사용된 미분방정식의 수치 적분 방법과 변수의 초기치 계산방법에 대하여 기술한다.

#### 2.3.1 미분방정식의 수치적분

안정도에 관한 방정식은 비선형의 연립 상미분

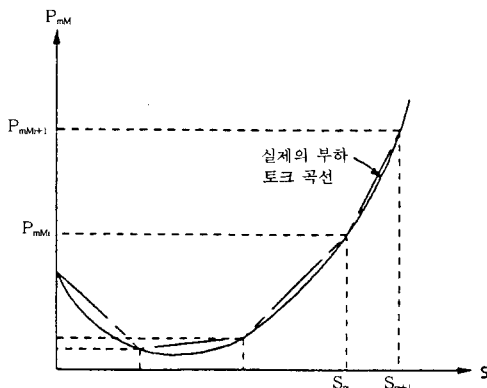


그림 2.1 부하 토크 특성 곡선  
Fig. 2.1 Load-torque characteristic curve.

방정식으로 이 방정식의 해를 구하는데 널리 쓰이고 있는 방법으로는 수정 오일러(EULER)법, 제형 적분법(Trapezoidal Rule), 룬게-쿠타법(RUNGE-KUTTA)등이 사용되고 있다. 이 중에서 정밀도가 높은 룬게-쿠타법이 대표적으로 사용되었으나 계산시간의 과다로 최근에는 수치안정도가 좋은 제형 적분법이 주로 사용되는 추세이다.

본 논문에서는 제형 적분법을 이용하여 계산을 수행하였으며, 이 방법은 예측 수정법(Predictor and Corrector Method)의 한 방법으로써 현재의 점  $P_i(x_i, y_i)$ 와 그 직전에 얻어진 2개(또는 1개)의 점  $P_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ ,  $P_{i-2}(x_{i-2}, y_{i-2})$ 를 사용하고, 다음의 점  $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 를 예측식(Predictor)에 의해서 가정한 점으로써 결정하고 이것을 다른 수정식(Corrector)을 기본으로 하여 축차 수정하는 방법이다.

Trapezoidal의 예측 및 수정식은 식 (2.17), 식 (2.18)이 사용된다.

$$\text{예측식: } w_{y_{i+1}} = y_{i-1} + 2h f(x_i, y_i) \quad (2.17)$$

$$\text{수정식: } k_{i+1} y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2} [f(x_i, y_i) + f(x_i + h, w_{y_{i+1}})] \quad (2.18)$$

우선 예측식에 의해 가정점  $(x_i + h, w_{y_{i+1}})$ 을 결정하고, 수정식을  $k=0, 1, 2, \dots$ 로 변화하며  $y_{i+1}$ ,  $w_{y_{i+1}}$ ,  $w_{y_{i+1}}$ ,  $\dots$ 과 같이 결정점을 수정하여 수렴시키는 방법이다.

#### 2.3.2 초기치 계산

안정도 계산시 계통의 상태 변화전에 조류계산에서 얻어진 초기 계통상태 값을 알고 이 값에 의해 동기기 및 유도기 계산에 필요한 초기 계산 값을 지정해 주어야 한다.

##### 1) 동기기

동기기의 상세 모델에 대한 벡터도는 그림 2.2와 같이 표현된다.

위 그림에서 계통의 실, 허축을  $d, q$ 축으로 변환하기 위해  $\delta$ 를 구하여야 한다. 단자전압  $V_0$  및 단자에 있어서 출력  $P_{G0} + jQ_{G0}$ 는 초기조류계산에 의해 알고 있으므로 상차각 계산식은 다음과 같다.

$$P_{G0} + jQ_{G0} = V_0 \cdot I_{G0}^* = V_0 I_{G0} (\cos\beta + j\sin\beta)$$

$$I_{G0} = \frac{1}{V_{\theta}} \sqrt{P_{G0}^2 + Q_{G0}^2}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{Q_{G0}}{P_{G0}} \quad (2.19)$$

$$\tan(\delta - \alpha) = \frac{X_q I_{G0} \cos\beta - R_a I_{G0} \sin\beta}{V_{\theta} + R_a \cdot I_{G0} \cos\beta + X_q I_{G0} \sin\beta}$$

$$\therefore \delta = \alpha + \tan^{-1} \left( \frac{X_q I_{G0} \cos\beta - R_a I_{G0} \sin\beta}{V_{\theta} + R_a \cdot I_{G0} \cos\beta + X_q I_{G0} \sin\beta} \right) \quad (2.20)$$

이것에 의해 계통측 기준축의 제량을 d, q축성분으로 변환할 수 있다.

2) 유도기

초기 조류계산에 의해 구한 모선의 전압(단자 전압)  $V_1$ 와 모선에 연결된 부하는  $P_L + jQ_L$ 에 의해 계산한다.

모선에 일반부하( $P_{Lset} + jQ_{Lset}$ )와 유도기가 연결된 경우 유도기에 흐르는 전력을  $P_{Lm} + jQ_{Lm}$ 으로 놓으면 유도기의 초기 전압, 전류는 식 (2.21), 식 (2.22)로부터 구한다.

$$P_{Lm} = P_L + P_{Lset}$$

$$Q_{Lm} = Q_L - Q_{Lset}$$

$$E'_0 = \frac{(R_a P_{Lm} - X' Q_{Lm} - V_1^2) + j(X' P_{Lm} - R_a Q_{Lm})}{V_1^*} \quad (2.21)$$

$$I_{M0} = \frac{V_1 - E'_0}{R_a + jX'} \quad (2.22)$$

또한, 유도기의 전기적 입력, 전기적 출력은 식

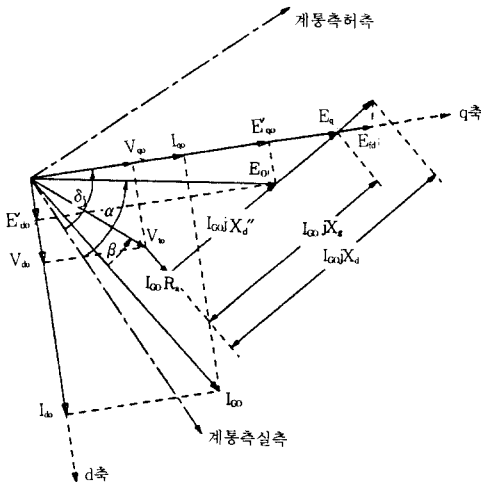


그림 2.1 발전기 전압, 전류 벡터도  
Fig. 2.1 Vector diagram of generator voltage and current.

(2.23)과 같이 된다.

$$P_{eM0} + jQ_{eM0} = E'_0 I_{M0}^* \quad (2.23)$$

초기 슬립  $S_{\theta 0}$ 을 구하는 방법으로는 식 (2.12)에서 식 (2.24)와 같이 된다.

$$S_{\theta 0} = \frac{E'_R + (X - X') I_1}{\omega_s T_d E'_V} \quad (2.24)$$

2.3.3 계산순서

과도안정도 계산순서는 다음과 같다.

- 1) 계통변경전의 계통구성, 발전, 부하 조건에 대해서 조류계산을 행한다.
  - 2) 계통 변경전의 모선 어드미턴스 행렬(Y-Matrix)을 계산한다.
  - 3) 2.3.2절에서 설명한 발전기 및 유도기등의 내부전압, 위상각, 출력 등의 초기치  $E_{\theta 0}$ ,  $\delta_{\theta 0}$ ,  $P_{\theta 0}$  등을 구한다.
  - 4) 발전기 내부 전압간의 전달 어드미턴스  $Y_{ik0}$ 을 구한다.
  - 5)  $t=0$ 로 세트(set)한다.
  - 6) 고장발생, 차단기 개폐등 회로 조건변화에 대한 유무를 check한다.
  - 7) 회로 조건변화가 있는 경우에는 변화후의 회로정수  $Y_{ij}$ 등을 계산한다.
  - 8) 발전기 및 유도기 특성을 나타내는 연립 미분방정식을 풀어서  $\Delta t$ 초후  $t=t+\Delta t$ 의  $X_{k(t+\Delta t)}$ 를 계산한다.
  - 9) 시간을  $t=t+\Delta t$ 로 세트(set)한다.
  - 10)  $t < T_{max}$ (계산종료시간)이면 5)로 되돌아가  $\Delta t$ 초후의 계 변수값들을 계산한다.
- 위 계산 플로우에서 5)~9)까지 스텝을  $t \geq T_{max}$ 까지 반복한다.

3. 전력 조류 계산

동특성해석을 위한 전력조류계산 방법으로서 정상운전시 상태변수의 초기치결정을 위한 조류계산은 뉴턴-랩슨법을 사용하고 과도시의 조류계산에는 모선 어드미턴스 행렬 삼각화 분해법을 이용하였다.

3.1 유도기를 고려한 초기 조류계산

초기 조류계산에 있어서 유도 전동기가 연결된

모선은  $Q_{Lm}$ 에 대하여 자코비언을 수정해야 한다. 유도기의 회전자 식 (2.12)에서 정상시에는 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E' - j(X - X')I_1 + j\omega_s S_p T_0' E' = 0 \quad (3.1)$$

또한 유도기의 부하는 식 (3.2)와 같으며

$$P_{Lm} + jQ_{Lm} = E' I_1^* \quad (3.2)$$

식 (3.1)을 실수와 허수부로 나누어  $S_p$ 를 소거하여 정리하면

$$E_R^2 + E_I^2 + (X - X')(E_I' I_1 - E_I' I_R) = 0 \quad (3.3)$$

이 되고, 식 (3.2)은

$$Q_{Lm} = E_R' I_R - E_R' I_1 \quad (3.4)$$

이며 식 (3.3), 식 (3.4)에 의하여  $Q_{Lm}$ 에 관해 다음의 식이 성립된다.

$$Q_{Lm} = \frac{E'^2}{X - X'} \quad (3.5)$$

따라서, 유도기가 연결된 모선의 배후 모선의 자코비 행렬  $\frac{\partial Q_i'}{\partial E'}$  는 식 (3.6)에 의하여 계산한다.

$$\frac{\partial Q_i'}{\partial E'} = \frac{Q_i'}{E'} - B_{ii} E' + \frac{2 \cdot E'}{X - X'} \quad (3.6)$$

여기서,  $B_{ii}$ 는 어드미턴스의 허수부인 서셉턴스

### 3.2 과도 전력조류계산

전력계통 동특성에 대한 모의는 계통상태 미분방정식과 전력조류 대수방정식의 연립해를 요구한다. 이때 미분방정식을 대수방정식으로 변환하여 전력조류 대수 방정식과 동시에 해를 하나의 해법으로 구하기도 하지만, 통상 두 방정식을 각기 다른 해법을 사용하여 교대로 해를 구하는 방식으로 채용하고 있다.

#### 3.2.1 회로 방정식

회로망의 식은 계통 공통의 주파수로서 회전하는 좌표계로서 표현된다. 노드 k에 대하여 회로망의 식은

$$I_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} V_m \quad (n: \text{노드수}) \quad (3.7)$$

으로 표현되며, 노드 k에 유입하는 전류  $I_k$ 는 노드 k에 공급되는 전류  $I_{gk}$ 와 소비되는 전류  $I_{lk}$ 로서 결정된다.

$$I_k = I_{gk} - I_{lk} \quad (3.8)$$

식 (3.8)에서  $I_k$ 는 노드 k에 접속된 기기에 의

해 결정된다. 그림 3.1에서 계통의 모선에 연결된 발전기, 유도기 및 부하등을 전류 방정식으로 표현하여, 전체의 요소가 노드 K에 접속되어 있는 경우를 생각하면 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & -Y_{KG} E_{KG} - Y_{KM} E_{KM} - \frac{P_L - jQ_L}{V_K^*} \\ & = Y_{K1} V_1 + \dots + (-Y_{KG} - Y_{KM} + Y_{KL} + Y_{KK}) V_K + \dots \\ & + Y_{Kn} V_n \end{aligned} \quad (3.9)$$

윗 식에서 첨자 G, M, L은 각각 발전기, 유도기, 부하를 의미한다.

#### 3.2.2 회로방정식의 계산방법

부하에 비선형부하특성을 고려하면 앞에서 설명한 식과 같이 전압에 관한 비선형 방정식으로 되기 때문에 수렴 계산을 행할 필요가 있다.

$$-Y_G E_G'(t) - Y_M E_M'(t) - I_L^{(n)} = YV(t)^{(n+1)} \quad (3.10)$$

$$I_L^{(n)} = f_L(V(t)^{(n)}) \quad (3.11)$$

식 (3.10), 식 (3.11)에 대한 회로망 방정식의 계산순서는 다음과 같다.

- 1) 동기기 및 유도기의 각 노-드에 주입하는 전류를 계산한다.
- 2)  $V_i^{(n)}$ 를 세트(set)한다. 통상은  $V_{i-\Delta t}$ 의 값으로 한다. 계통급변시는 한번 전체의 정임피던스 부하로서 전압을 구하고 이것을 초기치로 한다.
- 3)  $I_L^{(n+1)}$ 를 계산한다.
- 4)  $I = YV$ 에 의해  $V_i^{(n+1)}$ 를 결정한다.
- 5)  $|V_i^{(n+1)} - V_i^{(n)}| < \epsilon$ 이면 수렴하고 아닌 경우는  $n = n + 1$ 로 한다.
- 6)  $V_i^{(n)} = V_i^{(n-1)} + \alpha(V_i^{(n)} - V_i^{(n-1)})$ 로서  $\alpha$ 는 가속계수로하여 3)으로 되돌아가 반복 계산한다.

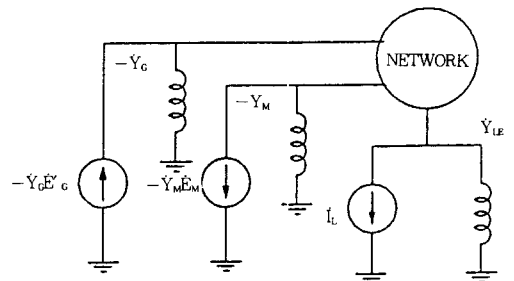


그림 3.1 계통에 연결된 부하  
Fig. 3.1 Load connected to power system.

#### 4. 사례연구

##### 4.1 모델전력계통

모델 전력 계통으로서는 그림 4.1과 같이 345KV방사상 계통을 채택하였다. 전원용량(10,000MVA)은 그림에서와 같이 승압 변압기를 사용하여 대전력 계통에 전력을 공급하고 송전선로는 2회선으로 구성하였으며, 부하는 변압기를 사용하여 모선 4에 유도 전동기부하(Induction Motor Load : IM)와 정임피던스(Constant Impedance Load)가 연결된 계통으로 하였다. 특히 유도부하측 모선에는 유도부하의 전압 불안정 현상을 보상하기 위하여 정지형 콘덴서(SC)를 설치하는 것으로 하였다.

본 시스템은 정임피던스 부하 및 유도부하로 인한 전력계통의 전압 영향의 변화 요인을 분석하기 위한 경우로써 송전선로 2회선중 1회선이 차단되는 경우에 대해 여러가지 시뮬레이션을 수행하였다.

계산에 적용한 데이터는(100MVA기준) 다음과 같다.

1) 송전선로(1회선당) :  $R=0.0064P.U$ ,  $X=0.0786P.U$ ,  $Y_c=0.506P.U$

2) 부하선로(모선 4, 5간 및 모선 4, 6간) :  $R=0.0P.U$ ,  $X=0.0001P.U$

3) 변압기(NO.1 및 NO.2) :  $R=0.0005P.U$ ,  $X=0.01P.U$

4) 동기발전기(자기 용량 기준) : 용량 10,000MVA,  $M=10,000(SEC)$ ,  $X_{d'}=0.117$ ,  $X_{q'}=0.511$ ,  $X_q=1.51$ ,  $X_d=0.01$ ,  $R_a=0.001$ (기타 정수는 무시함)

5) 유도전동기(자기 용량 기준) : 용량 313MVA,  $M=10.0(SEC)$ ,  $R_1=R_2=0.011$ ,  $X_1=X_2=0.212$ ,  $X_m=2.0$

6) 정임피던스부하 :  $P_L=285MW$ ,  $Q_L=130MVAR$

##### 4.2 계산결과 및 고찰

1) 부하모선에 정임피던스 부하만 연결된 경우 (Case 1)

그림 4.1에서 부하 모선에 일반 정임피던스

부하만 100%(313MVA) 연결된 경우에 대하여 송전선로 1회선 차단시 계통 전압 변화의 영향을 1초간 시뮬레이션한 결과는 그림 4.2와 같다.

그림 (a)는 모선 1번 및 4번 전압, (b)는 3번과 4번간의 유효전력 및 무효전력 조류의 값을 표시하였다. 그림 4.2(a)에서 송전선로가 0.1초 시점에서 1회선이 차단되었을 때 모선 4번의 전

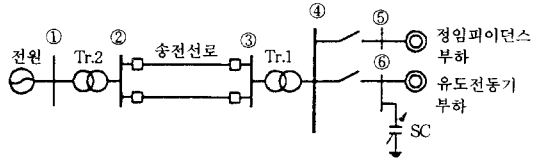
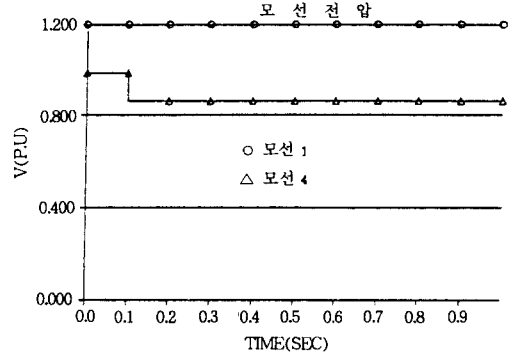
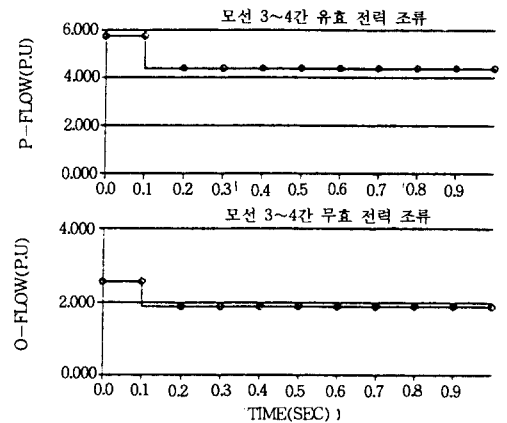


그림 4.1 모델계통도  
Fig. 4.1 Model system.



(a)



(b)

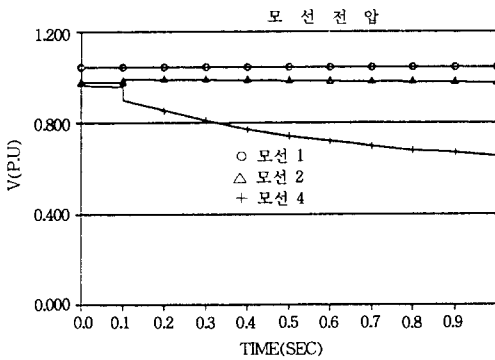
그림 4.2 정임피던스 부하 100%에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 4.2 Simulation result for 100% constant impedance load.

압을 나타내고 있다. 즉 송전선로가 1회선 차단되는 경우 선로의 전압이 기준전압에 대하여 18% 강하함을 나타내고 있다.

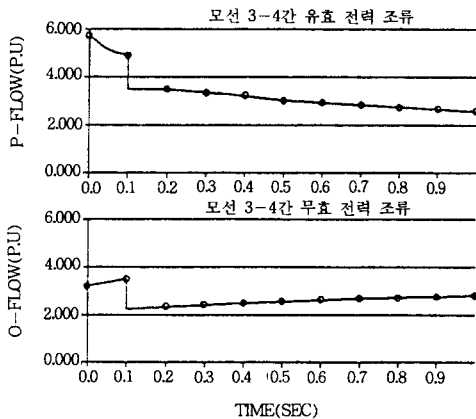
2) 부하모선에 유도 전동기 부하와 정임피던스 부하가 있는 경우(Case 2)

그림 4.1의 부하모선 4에 유도 전동기 부하 및 정임피던스 부하가 50%씩 연결된 경우에 송전선로 1회선 차단시 계통 전압 변화의 영향을 1초간 시뮬레이션한 결과는 그림 4.3과 같다.

그림 4.3(a)에서 0.1초시점에서 송전선로가 1회선 차단된 경우 모선 4번의 전압은 초기에는 0.85PU 정도로 떨어지나, 1초 이내에 0.65PU 정도로 빨리 떨어진다. 유도 전동기 부하로 인한 계통의 전압 불안정 현상은 전압이 0.7PU 이후에



(a)



(b)

그림 4.3 유도 전동기 및 정임피던스 부하 50%에 대한 시뮬레이션 결과

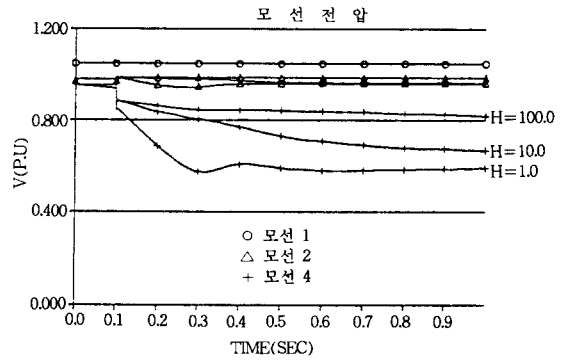
Fig. 4.3 Simulation result for IM, and constant impedance load 50%.

일어나기 시작한다. 그림 4.3(b)에서는 이때 송전선로에 흐르는 전력 조류로서 유도 부하의 유효(P)분은 떨어지고, 무효전력(Q)은 전압이 떨어지는 만큼 증가하고 있는 상태를 나타내고 있다. 즉, 유도 전동기 부하로 인하여 계통의 과도적인 전압 불안정 현상을 야기하며 이로 인하여 계통이 정전될 수 있다.

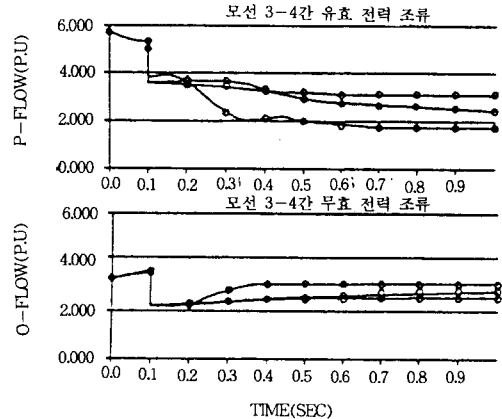
3) Case 2에서 유도 부하의 관성정수 변화시(Case 3)

Case 2의 경우에서 유도 전동기 부하의 관성정수(Motor Inertia Constant)변화시, 부하 모선 전압과 송전선로 조류변화에 대한 시뮬레이션 결과는 각각 그림 4.4의 (a) 및 (b)와 같다.

4) 정임피던스부하와 유도전동기 부하의 비율 변경시(case 4)



(a)



(b)

그림 4.4 유도전동기 부하 관성정수 변화시의 시뮬레이션 결과

Fig. 4.4 Simulation result for different values of the motor inertia constant.



정임피던스 부하와 유도전동기 부하의 비율을 변경시 부하모선전압과 송전선로 조류변화에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4.5의 (a) 및 (b)와 같다.

Case 3의 시뮬레이션 결과에서와 같이 유도기의 관성정수(H)가 작을수록 전압 불안정 현상에 미치는 현상이 크다.

Case 4의 시뮬레이션에서 유도부하의 비율이 클수록 전압강하가 크다.

### 4.3 유도부하에 대한 전압 안정화향상

유도부하로 인한 전압 불안정현상을 보상하기 위하여 그림 4.1에서 유도 부하 모선에 정지형 콘덴서(SC)를 다음과 같이 모델화하여 시뮬레이

션을 한다.

#### 4.3.1 시뮬레이션 방법

유도부하로 인한 모선 전압 불안정 현상을 막기위하여 정지형 콘덴서(SC)를 시간에 따라 필요 용량을 투입하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. 정지형 콘덴서의 투입 모선과 투입량은 표 4.1과 같다.

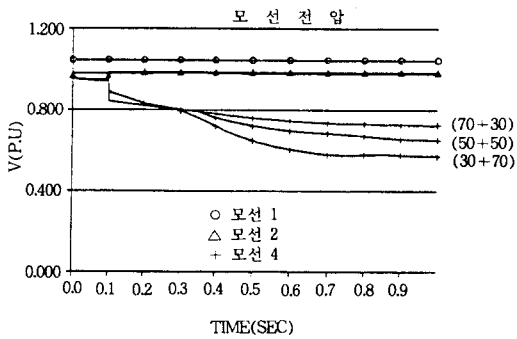
표 4.1 정지형 콘덴서 운전 조건

Table 4.1 SC operation condition.

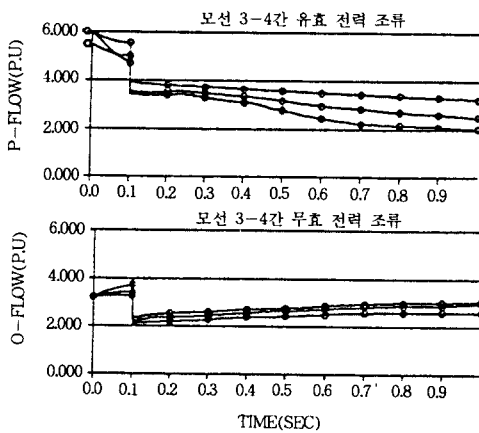
연결모선	Time	SC투입량(MVA)
bus 6	0.20	40
	0.25	30
	0.30	30

#### 4.3.2 계산결과 및 고찰

SC를 부하의 무효전력(Q) 변화에 따라 투입하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4.7과 같으며, 그림에서 모선 4번의 전압은 정상 상태로 회복될 수 있다. 즉, SC의 자동투입으로 유도부하로 인한 계통전압 불안정 현상을 막을 수 있다.



(a)



(b)

그림 4.5 부하량 비율 변화에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 4.5 Simulation result for different load percentages.

## 5. 결 론

일반적으로 전압 불안정 현상은 부하에 무효전력 공급부족으로 인하여 계통전압을 유지할 수 없는 경우로서 부하단의 부하 구성요소에 따라 많은 영향을 미치고 있다. 본 논문은 전력계통의 유도부하 특히 유도전동기 부하가 전력계통의 전압안정성에 미치는 영향을 조사 분석한 논문으로 그 주요 내용은 다음과 같다.

1) 전력계통의 부하로서 정임피던스 부하와 유도전동기 부하의 비율, 유도 전동기의 관성 정수 등이 계통의 전압 불안정 현상에 미치는 영향을 조사한 결과 유도 부하의 비율이 크거나 관성 정수가 적은 경우가 전압 불안정 현상에 미치는 영향이 크다.

2) 유도전동기 부하의 비율이 클 경우에는 그 부하가 연결된 회로의 개로시 즉 단순한 계통의 회로변경시에도 전압 불안정 현상을 일으킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. P.M. Anderson, A.A. Found, "Power System Control and Stability", IOWA STATE University Press., 1977.
2. M.A. Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill New Delhi, 1979.
3. H. Dommel and N. Sato, "Fast Transient Stability Solutions, IEEE Trans., Vol. PAS-91, pp. 1643~1650, July 1972.
4. N. Sato and W.F. Tinney, "Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-82, pp. 944~950, Dec. 1963.
5. H.Z. EL-Sadek and F.N. Abdelbarr, "Effects of Induction Motor Load in Provoking Transient Voltage Instabilities in Power System", EPSR., pp. 119~127, 1989.
6. S. Abe, et al, "Power Systems Voltage Stability", IEEE Trans., Vol PAS-101, No. 10, pp. 3830~3840, Oct. 1982.
7. A.E. Hammad, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static VAR Compensators", IEEE Trans., Vol. PWRS-1, No. 4, pp. 222~227, Nov. 1986.

◇ 著 者 紹 介 ◇

정 재 길 (鄭在吉)

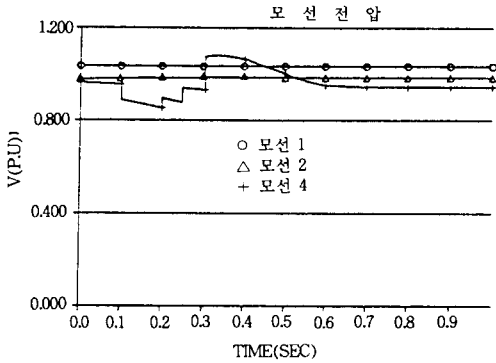


1934年 8月 24日生. 1961年 서울대 工大 電氣工學科 卒. 1973年 서울대 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1984年 崇實大 大學院 電子工學科 卒(博士). '61~'74年 韓國電力 勤務. 大韓電氣學會 財務, 總務理事 歷任. '74~現在 中央大 工大 教授. 現在 大韓電氣學會 監事.

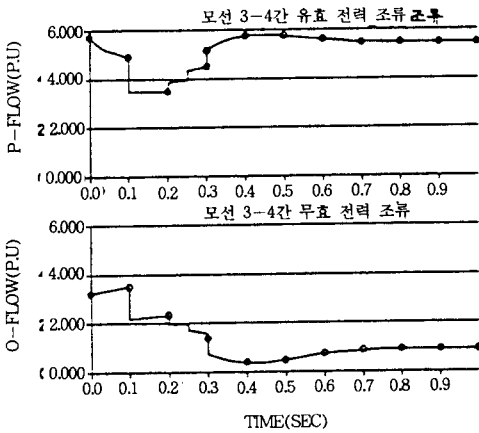
조 양 행 (趙揚行)



1954年 6月 11日生. 1980年 明知大 電氣工學科 卒. 1982年 明知大 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1994年 中央大 大學院 電氣工學科 卒(博士). '74~'83年 韓國電力 勤務. '83~現在 포스코엔지니어링(株) 勤務.



(a)



(b)

그림 4.7 정지형 콘덴서 적용에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 4.7 Simulation result for SC application

3) 이 유도 부하로 인한 전압불안정 현상은 부하의 무효 전력 변화에 따라 적정 용량의 콘덴서 용량을 투입하므로 방지할 수 있다.

4) 상기 전압안정성 해석 방법으로서 비선형 미분방정식의 해법으로는 계산속도 면에서 우수한 제형법을 사용하였다.

또한 본 동특성 해석을 위한 전력조류계산은 정상 운전시 초기 계산과 과도시의 계산은 별도로 계산토록 하였다. 즉, 정상시 초기 조류계산에서는 뉴튼-랩슨 방법에 의해 계산하였으며 과도시 조류계산은 모선 어드미턴스행렬 삼각화 분해법을 이용하였다.