

# 유도부하가 전력계통의 전압안정화에 미치는 영향

\*정 재길 \*\*박 성대 \*\*\*조 양행 \*오 창근

\*중양대학교 \*\*명지실업 전문대학 \*\*\*제철 엔지니어링

## The Influence of Inductive Loads on Power System Voltage Stabilization

\*jai-kil chung \*\*sung-dae park \*\*\*°yang-haeng cho \*chang-keun oh

\*Dept of Electrical Eng., Chang-Ang Univ. \*\*Myung Ji Junior Colleague \*\*\*Posco Engineering Co., Ltd

### ABSTRACT

This paper shows that the presence of constant impedance loads and induction motors in power system's loading contents can lead to transient voltage instabilities during normal system manipulations such as switchings. The abnormal induction motor characteristics during system transients which initiate the voltage instabilities are illustrated. The influence of motor and network parameters, such as motor inertia, mechanical load quantity and nature on the severity of the voltage instability are studied.

### 1. 서 론

전력계통의 동적해석은 전력계통의 운용 및 계획시 전력계통의 성질을 이해하고 성능의 계산 및 예측을 위한 필수적인 분야로써 지금까지 많은 연구가 국내외적으로 수행되어 왔다. 최근에는 전력계통의 동적해석중에서 전압 안정성에 관한 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.

전압 불안정의 주요원인은 비정상적인 계통 운용이나 제어계 동작하에서 부하의 무효전력요구에 불충분하기 때문이다. 통상 과도적인 전압 불안정은 2가지 형태로 일어나며, 지속적인 전압동요나 전압붕괴는 모선에서 전압이 빠르게 강하되어 가는 특성이 있다. 일반적으로 이들 불안정은 수용가에 전력공급을 못하게 된다. 본 논문에서는 전력계통의 동특성중 전압안정화에 중점을 두고 전압불안정에 가장 심하게 영향을 미치는 각종 요인을 조사 검토하고 특히 유도부하가 전압 안정화에 미치는 영향을 조사하고 불안정 현상을 막을 수 있는 방법을 제시한다. 즉 계통에 전력용 콘덴서를 부하의 운동에 따라 적정 용량을 투입하여 전압 불안정 현상을 줄일 수 있는 방법을 제시한다.

### 2. 유도부하를 고려한 전력계통 모델링과 해석방법

#### 2.1 동특성 해석 기본식

전력계통 동특성을 표현하는 방정식은 회전자와 그 제어회로의 동작상태를 나타내는 미분방정식과 전력계통 구성을 나타내는 대수방정식으로 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 해법으로 주로 사용되고 있는 방법은 초기 전력 조류계산으로부터 상태변수의 초기치  $X_0$ 를 구하고 식 (2.2)로부터 고정시 회로망방정식을 풀어서  $Y(t)$ 를 계산한 다음, 식(2.1)에서 수치 적분을 행하여  $X(t)$ 를 구하는 순서를 취하면서 식(2.2)와 (2.1)의 해를 고대로 구하여 회전자의 동요 곡선 (Swing Curve)를 얻는 방법이다.

#### 2.2 동특성 모델링

##### 1) 동기 발전기

PARK의 기본식에 따라서 회전자권선과 d축에 개자 및 하나의 제동권선 q축에 2종류의 제동권선을 고려한 발전기 등가 회로

가 사용된다.

d, q축 전기자 전압 방정식은 식(2.3)와 같으며

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} - R_a \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\phi_q \\ \phi_d \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

또한 회전자 회로의 전압 방정식은 식(2.4)과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_{fd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{fd} \\ \phi_{kd} \\ \phi_{fq} \\ \phi_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{fd} & 0 \\ 0 & R_{kd} \\ 0 & R_{fq} \\ 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{kd} \\ I_{fq} \\ I_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

PARK식에 대한 전압방정식은 과도 안정도 계산시에는 초과도 리액턴스  $X_d''$ ,  $X_q''$ 를 사용하고, 배후 전압  $E_d''$ ,  $E_q''$ 를 일정하게 하고 계통측과의 결합을 한다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} -\phi_d'' \\ \phi_q'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & -\omega X_q'' \\ \omega X_d'' & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

식(2.5)에서 초과도시의 돌극성을 무시 ( $X_d'' = X_q''$ )

하고,  $X_d''$ 에 대한 주파수 변화를 무시하면 식(2.6)과 같이 된다.

$$V = E' - (Ra + jXd'')I \quad (2.6)$$

PARK의 식에 의한 모델에 있어서 각 수식은 발전기의 좌표계 (PARK의 좌표계)로 표현하게 되었으므로 이를 회로망과 결합할 때에는 회로망의 좌표계 (KRON의 좌표계)로 변환할 필요가 있으며, 이때 변환식은 식(2.7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_R \\ K_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

터어빈에서 발전기 회전자에 가해지는 기계적인 입력을  $Pm[W]$ , 발전기의 전기적 출력력을  $Pe[W]$ 라 하면 발전기의 운동방정식을 식 (2.8)과 같다.

$$\frac{M}{\omega_n} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_n} \frac{d \delta}{dt} + P_e = P_m \quad (2.8)$$

#### 2) 부하

안정도 계산시 부하에 대한 계산은 전압특성 및 주파수특성과 관련하여 계산기에 의하여 정밀도가 가능해졌고, 부하특성으로 인한 계통 DAMPING의 영향을 무시할 수 없으며, 장시간에 걸친 현상해석의 필요성 등으로 인하여 중요성이 증가하고 있다. 부하에는 수종류의 것이 포함되어 있으므로 이들을 모델링 하는 방법으로는 유도기 및 동기 전동기 부하를 제외하고는 다음과 같이 크게 3가지로 분류하여 표현되고 있다.

- 임피던스 부하 (전압의 2승에 비례하는 부하)
- 정전류부하 (전압의 1승에 비례하는 부하)
- 정전력부하 (전압에 관계없는 부하)

#### 3) 유도 전동기 부하

전력 계통의 과도안정도 연구에서 대부분 계통에 연결된 부하는 병렬 임피던스로 취급한다. 그러나 모든 부하는 병렬 임피던스와 같은 특성을 갖지 않으므로 계통 전압이나 주파수 변화에 대한 유, 무효 전력의 변화를 고려한 부하 모델링을 하여야 하며 유도기의 경우에는 부하관성을 고려할 필요가 있다. 과도 안정도의 경우에 있어서 이러한 유도 부하는 발전기의 동요에 중요한 요인이 되고 있다. 실제적으로 동기 모터는 동기 발전기와 같이 모델링 하여 취급하고 있다.

리액턴스  $X'$ 의 배후전압 ( $E'$ )의 변화를 미분방정식으로 표현한 식(2.9), 식(2.10)과 같이 된다.

$$\frac{dE'}{dt} = -j\omega_s \cdot SE' - (E' - j(X-X')I_I) / T_0 \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_R' \\ E_I' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} & \omega_s - \omega_r \\ -\omega_s + \omega_r & -\frac{1}{T_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R' \\ E_I' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{X-X'}{T_0} \\ \frac{X-X'}{T_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{IR} \\ I_{IU} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

유도기의 운동방정식은 다음식으로 표현된다.

$$M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_{em} = P_{mM} \quad (2.11)$$

### 2.3 해석 방법

안정도 계산시 계통의 상태 변화전에 조류계산에서 얻어진 초기 계통상태값을 알고 이 값에 의해 동기 및 유도기 계산에 필요한 초기계산 값을 지정해 주어야 한다. 발전기에서 계통의 실, 허축을  $d, q$  축으로 변환하기 위해  $\delta$ 를 구하여야 한다.

$$\delta = \alpha + \tan^{-1} \left( \frac{X_q I_{co} \cos \beta - R_a I_{co} \sin \beta}{V \omega + R_a I_{co} \cos \beta + X_d I_{co} \sin \beta} \right) \quad (2.12)$$

이것에 의해, 계통축 기준축의 제약을,  $d-q$  축 성분으로 변환할 수 있다. 유도기의 경우에는 초기 조류계산에 의해 구한 모선의 전압(단자전압)  $V_I$ 와  $P_L + jQ_L$ 에 의해 계산한다.

즉, 초기 슬립  $S_0$ 는

$$S_0 = \frac{E_I + (X-X')I_I}{\omega_s T_0 E_I} \quad (2.13)$$

에 의해 구하고 부하 토크 특성의  $P_{mM}$ 은 부하 토크 특성 초기값에 의해 결정된다. 과도 안정도의 수식은 비선형의 연립 상미분 방정식으로 이 방정식의 해를 구하는데 널리 쓰이고 있는 방법으로는 수정 오일러(EULER)법, 대형 적분법(Trapezoidal Rule), 룬게-쿠타법(RUNGE-KUTTA) 등이 사용되고 있다. 이 중에서 정도(精度)가 높은 룬게-쿠타법이 대표적으로 사용되었으나 계산시간의 과대로 최근에는 수치안정도가 좋은 대형 적분법이 주로 사용되는 추세이다. 본 논문에서는 대형 적분법을 이용하여 계산을 수행하였으며 계산순서는 다음과 같다.

- 1) 계통 변경전의 계통구성, 발전, 부하 조건에 대해서 조류계산을 행한다.
- 2) 계통 변경전의 모선 어드미턴스 매트릭스(Y-Matrix)를 계산한다.
- 3) 발전기 및 유도기등의 내부전압, 위상각, 출력 등의 초기치  $E_{io}, \delta_{io}, P_{io}$  등을 구한다.
- 4) 발전기 내부전압간의 전달어드미턴스  $Y_{ij}(0)$ 를 구한다.
- 5)  $t = 0$ 로 세트(set)한다.
- 6) 고장발생, 차단기 개폐등 회로 조건 변화에 대한 유무를 check 한다.
- 7) 회로 조건 변화가 있는 경우에는 변화후의 회로 정수  $Y_{ij}$  등을 계산한다.
- 8) 발전기 및 유도기 특성을 나타내는 연립 미분 방정식을 풀어서  $\Delta t$ 초후 ( $t = t + \Delta t$ )의  $x_i(t + \Delta t)$ 를 계산한다.
- 9) 시간을  $t = t + \Delta t$ 로 세트(set)한다.
- 10)  $t < T_{max}$  (계산종료시간) 이면 5)로 되돌아가  $\Delta t$ 초후의 계변수값들을 계산한다. 위 계산 플로우에서 5)~9)까지 스텝을  $t < T_{max}$  까지 반복한다.

### 3. 전력조류계산

본 계산에서는 전력조류계산 프로그램과 과도 안정도 계산 프로그램을 각각 독립하여 운용될 수 있도록 하였다. 전력조류계산 초기해법은 뉴턴-랩슨법을 이용하였으며 과도시 조류계산은 모선 어드미턴스 삼각화 행렬분해법을 이용하였다.

#### 3.1 초기 조류 계산

현재 전력계통의 조류해석에서 가장 널리 사용되고 있는 뉴턴-랩슨법이다. 조류계산에서 미지값  $|V|$ 와  $\theta$ 를  $X$ 라 놓고, 지정 변수 값들의 벡터를  $Y$ 라 하면 다음과 같이 요약된다.

$$X = \begin{bmatrix} |V| & \text{on each} \\ \theta & P-Q \text{ node} \\ & \text{on each} \\ \theta & P-V \text{ node} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} P & \text{on slack node} \\ \theta & \\ P_i & \text{on each P-Q node} \\ Q_i \\ P_i & \text{on each P-V node} \\ |V_i| \end{bmatrix}$$

이로 부터 비선형 조류 방정식은  $F(X, Y) = 0$  이며, 뉴턴의 선형 방정식으로 표현하면 식(3.1)이 되고

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

먼저 각 모선전압을 가정하고 유효, 무효 전력편차를 계산한다.

식(3.1)에서 JACOBIAN 값을 알 수 있으므로  $\Delta V(k), \Delta \theta(k)$  값을 계산하고  $(k+1)$ 에는 식(3.2)를 이용하여 계산하여

$$\begin{aligned} |V|(k+1) &= |V|(k) + \Delta |V|(k) \\ \theta(k+1) &= \theta(k) + \Delta \theta(k) \end{aligned} \quad (3.2)$$

주어진 허용 오차 범위내에 수렴할 때까지 계속 반복 계산하게 되는 것이다.

#### 3.2 유도기를 고려한 초기 조류계산

초기 조류계산에 있어서 유도 전동기가 연결된 모선은 배후노드의 JACOBIAN Matrix 행렬의 요소는 식(3.3)에 의한 값으로 변경하여야 한다.

$$\frac{QT'}{E} = \frac{QT'}{E} - B_{ii} E + \frac{2 \cdot E}{X-X'} \quad (3.3)$$

#### 3.3 과도시 전력 조류 계산

계통 동특성 해석시 과도 기간중의 전력조류의 해는 발전기 등 요곡선에 상당한 영향을 미치므로 매우 중요한 부분이다. 과도 전력조류 해법에는 가우스-사이드(GAUSS-SEIDEL)법, 모선 어드미턴스 삼각화 행렬분해법, 뉴턴-랩슨법이 주로 사용되고 있다. 부하에 비선형부하특성을 고려하면 비선형 방정식으로 되기 때문에 수렴 계산을 행할 필요가 있다.

$$-Y_G E_G'(t) - Y_M E_M(t) - I_L^{(n)} = Y V(t)^{(n+1)} \quad (3.4)$$

$$I_L^{(n)} = I_L(V(t)^{(n)}) \quad (3.5)$$

회로망 방정식의 계산 순서는 다음과 같다.

- 1) 동기 및 유도기의 각 노드-에 주입하는 전류를 계산한다.
- 2)  $V_i(0)$ 를 세트(set)한다.  
동상은  $V_{i-\alpha}$ 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)  $V_i^{(n+1)} = V_i^{(n+1)} + \alpha (V_i^{(n)} - V_i^{(n+1)})$  ( $\alpha$ : 가속계수)
- 6)  $|V_i^{(n+1)} - V_i^{(n)}| < \epsilon$  이면  $V_i = V_i^{(n)}$ 로 하고 그렇지 않으면 3)로 되돌아가 반복계산한다.

#### 4. 사례 연구

##### 4.1 모델전력계통

모델 전력 계통으로는 그림 4.1과 같은 345 KV 방사상 계통을 채택한다. 전력은 승압 변압기를 사용하여 대전력 계통에 공급하고 송전선로는 2회선으로 구성한다.

부하는 2권선 변압기를 사용하여 유도부하(Induction Load)와 일반부하(Impedance Load)가 연결된 계통으로 하였다. 특히 유도부하 모션에는 유도 부하의 전압 불안정 현상을 보상하기 위하여 정지형 콘덴서(S.C)를 설치한다.

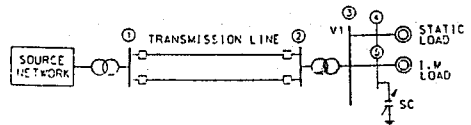


그림 4.1 모델계통

본 연구에서는 모델계통의 2회선중 1회선이 차단되는 경우에 일반 부하 및 유도부하가 전력계통의 전압에 미치는 영향에 관하여 조사 검토한다.

#### 4.2 계산결과 및 고찰

1) 부하 모션에 임피던스 부하(Static Load)만 연결된 경우 (CASE 1)

그림 4.1에서 부하 모션에 일반 임피던스 부하만 연결된 경우에 송전선로 1회선 차단시 계통 전압 변화의 영향을 1초 간에 걸쳐서 조사하였으며 이 경우의 시뮬레이션 결과를 표시하면 그림 4.2와 같다.

SIMULATION CASE NAME = STRO1

STRO1 STATE POWER FLUX CASE NAME = PPR01

MODE VOLTAGE

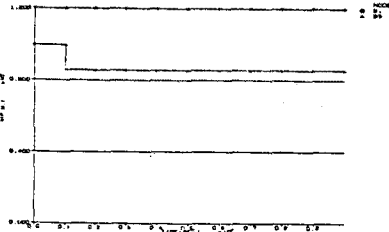


그림 4.2 Case 1. Simulation 결과

그림 4.2에서 송전선로가 0.1 sec 후 1회선이 차단되었을 때 모선 ③번의 전압과 부하 특성 곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서 송전선로가 2회선중 1회선 차단되는 경우 선로의 전압 강하의 변화 (기준 전압의 17% 강하) 분만이 V3에 나타나고 있다.

2) 부하모선에 유도 부하와 일반 부하가 있는 경우 (CASE 2) 그림 4.1의 부하모선에 유도 및 일반 부하가 50% 씩 연결된 경우 모델계통의 송전선로 1회선 차단시 계통 전압 변화의 영향을 1초간에 걸쳐서 조사하였으며 이 경우의 시뮬레이션 결과는 그림 4.3과 같다.

SIMULATION CASE NAME = STRO2

STRO2 STATE POWER FLUX CASE NAME = PPR02

MODE VOLTAGE

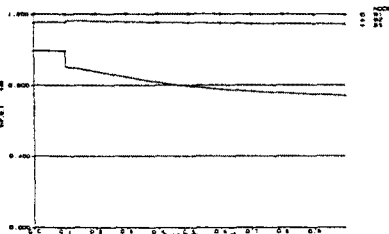


그림 4.3 Case 2. Simulation 결과

그림 4.3에서 0.1초후 송전선로가 1회선 차단된 경우 V3의 모선 전압은 초기에는 0.8 PU 정도로 떨어지나, 1초 이내에 0.65 PU 정도로 빨리 떨어진다. 유도부하로 인한 계통의 전압 불안정 현상은 전압이 0.7 PU 이하로 떨어진 후에 일어나기 시작한다. 이때 유도 부하의 유효(P)분은 떨어지고, 무효전력(Q)은 전압이 떨어지는 만큼 증가 하고 있다.

즉, 유도 부하로 인하여 계통의 과도적인 전압 불안정 현상을 야기하며 이로 인하여 계통이 정전될 수 있다.

3) CASE 2에서 유도 부하의 특성정수 변화시 (CASE 3) CASE 2의 경우에서 일반 부하와 유도 부하의 비율을 변화시켰을 경우(CASE 3.1)와 유도 부하의 관성 정수 (Motor Inertia Constant)(CASE 3.2)를 변화시켰을 경우의 V3 모선 전압 변화는 각각 그림 4.4, 그림 4.5와 같다.

SIMULATION CASE NAME = STRO3

STRO3 STATE POWER FLUX CASE NAME = PPR03

MODE VOLTAGE

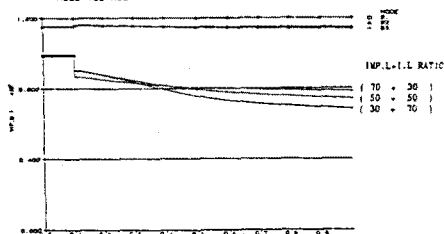


그림 4.4 Case 3-1 Simulation 결과

SIMULATION CASE NAME = STRO4

STRO4 STATE POWER FLUX CASE NAME = PPR04

MODE VOLTAGE

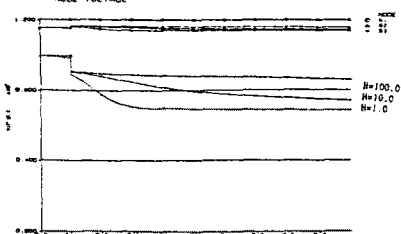


그림 4.5 Case 3-2 Simulation 결과

○ 각 시뮬레이션 결과에서와 같이 유도기의 특성 값에 따라 계통의 전압 불안정 현상에 미치는 현상이 크다.

4) 유도 부하에 대한 전압 안정도 향상 유도 부하로 인한 전압 불안정 현상을 보상하기 위하여 그림 4.1의 유도부하측 모선에 정지형 콘덴서(SC)를 연결하여 시뮬레이션을 한다. SC를 부하의 무효전력(Q)의 변화에 따라 투입하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4.6과 같으며, 그림에서 V3의 모선 전압은 정상 상태로 이끌 수 있다. 즉, SC의 자동투입 (SVC 적용)으로 유도부하로 인한 계통의 전압 불안정 현상을 막을 수 있다.

SIMULATION CASE NAME = STRO5

STRO5 STATE POWER FLUX CASE NAME = PPR05

MODE VOLTAGE

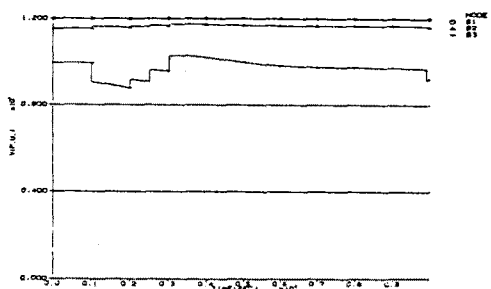


그림 4.6 Case Simulation 결과

### 5. 결론

본 논문에서는 계통 부하로서 정 임피던스와 유도 전동기로 구성된 부하를 상정하여 정상적인 계통 구성 변경시라도 과도적인 전압 불안정 현상을 야기할 수 있다는 것을 조사 검토한 것이다. 이러한 전압 불안정 현상을 막기 위한 방법으로 콘덴서를 이용하여 계통의 불안정 현상을 줄이고자 하였으며 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 전력계통의 동특성 해석에서는 비선형 고차미분방정식의 해를 구하는 방법으로는 분계-쿠타법, 오일러법 등이 많이 사용되고 있으나 본 연구에서는 전력계통 안정도 해석등에서 미분방정식은 선형 방정식으로 표현될수있으므로 이러한 경우에 계산면에서 우수한 대항법 (Trapezoidal Method)를 사용하여 해석의 정도를 기하였으며, 특히 동특성 해석에서 중요한 동기기, 유도기, 제어기 및 부하등에 대하여 상세 모델링을 적용하여 전력계통에서 유도 부하등이 전압불안정 현상을 야기할 수 있다는 과도해석을 수행하였다.

- 전력계통의 2회선 선로중 1회선 차단시와 같은 계통구성 변경시 모선전압은 일반부하 (정전력 또는 정 임피던스 부하)와 유도전동기 부하의 비율, 유도 전동기의 관성정수 등에 따라 큰 영향을 받으며 과도적인 전압불안정현상을 야기할수 있다.

- 정임피던스 부하의 경우 계통 변화시 전압 변화는 계통의 임피던스만큼 변화되지만 유도부하는 무효전력도 증가하며 계동전압 변화가 더 커져 전압 불안정 현상을 유인한다.

- 전압불안정 현상을 막을수 있는 방법으로는 계통에 전력용 콘덴서를 부하의 응용특성에 따라 적정용량을 투입하여 전압 불안정 현상을 줄일수 있었다.

### 참고문헌

- 1.S. Abe, et al. "Power Systems Voltage Stability" IEEE Trans., Vol PAS-101, No.10, October 1982, pp.3830-3840.
- 2.A. E. Hammad, "Analysis of Power System Stability Enhancement by Static VAR Compensators", IEEE Trans., Vol. PWRs-1, No. 4, Nov. 1986, pp222-227.
- 3.F.Rodriguez and O. Wasynczuk, "A Method of Representing Isolated Operation of a Group of Induction Motor Loads", IEEE Trans., Vol. PWRs-2, No.3, Aug. 1987, pp568-575.
- 4.J. Cathey, et al. "Transient Load Model of An Induction Motor", IEEE Trans., Vol. PAS-92, July 1973, pp 1399-1406.
- 5.G. Diana, R. Harley, "Transient Behaviour of Induction Motor Flux and Torque During Run-up", IEEE Trans., Vol. EC-2, No.3, Sept. 1987, pp.465.469.