

# 유도기모델을 사용한 동적 전압 안정도 해석II

김용배\* 김진중\* 김원걸\* 정태호\*\* 추진부\*\* 이상중\*\*

\* : 충남대학교

\*\* : 한전기술연구원

## KIM Y. B.\* F DYNAMIC VOLTAGE COLLAPSE ANALYZED BY INDUCTION MOTOR MODEL II

**ABSTRACT**— This paper deals with a methodology of the dynamic voltage stability analysis. The several physical power system constraints e.g upper and lower limit of SVC and OLTC are considered. The proposed equivalent load model is the combination induction motor and impedance load. The variation of System voltages and equivalent induction motor slips for actual power systems are simulated and plotted in this paper.

**Keywords:** 동적전압안정도(dynamic voltage stability), 동적전압안정성(dynamic voltage security), 외란(perturbation)

### 1. 서 론

본 논문은 유도전동기 모델을 사용한 동적 전압안정도 해석연구[13]의 후속 연구로서 모델계통에 적용된 알고리즘을 확장하여 실제계에 적용한 결과를 기술 하고 있다.

현재까지 국내적으로 실제계에 적용한 동적 전압안정도 연구의 사례가 없는 실정이다. 이전의 연구[13]에서는 모델계통에서의 동적 전압안정도 해석 기법을 개발하였으며, 부하의 동적특성 뿐만 아니라 제어기의 동적특성까지도 고려하여 실제적인 동적 전압안정도 해석이 가능한 모델을 제시 하였다. 또한, 물리적인 계통의 제약조건을 고려하기 위하여 발전기의 무효전력 상 하한값, SVC상 하한값, OLTC 상 하한값 등을 고려 하였다. 부하모델은 실제적인 부하의 특성을 나타내기 위하여 유도기와 임피던스부하가 복합된 모델을 사용하였다.

동적전압안정도 해석은 문제의 특성상 막대한 계산 시간과 기억용량을 필요로 한다. 따라서 실제계 적용시 스파시티 기법의 사용이 필수적이며, 계산시간의 단축을 위하여 선택적으로 계산을 할 수 있도록 하여야 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 개요

동적 전압안정도를 해석하기 위한 알고리즘은 참고 문헌[13]에 나타난 바와같이 정적모델과 동적모델로 분류된다. 정적모델은 부하의 수급조건을 만족하는 방정식이며, 동적모델은 평형상태로부터 외란이 발생하였을 경우 부하나 제어기의 동적특성에 따라 운동하는 계통의 상태를 나타낸다.

이러한 계통의 정적모델과 동적모델의 결과식을 아래에 나타내었다.

정적 모델:

- 조류계산 방정식

$$P_k + V_k \left\{ \sum_{j=1}^n (G_{kj} \cos \theta_{kj} + B_{kj} \sin \theta_{kj}) V_j \right\} = 0 \quad (1)$$

$$Q_k + V_k \left\{ \sum_{j=1}^n (G_{kj} \sin \theta_{kj} - B_{kj} \cos \theta_{kj}) V_j \right\} = 0 \quad (2)$$

$G_{kj}, B_{kj}$ : 모선 k,j 사이의 콘덕턴스, 서셉턴스

$P_{ek}, Q_{ek}$ : 모선 k 에 주입되는 유효, 무효전력

- 부하모선의 전력 방정식

$$\left\{ \left( \frac{R_M/s}{(R_M/s)^2 + X_M^2} + Y_k \right) + j \left( \frac{X_M}{(R_M/s)^2 + X_M^2} + B_{SVC} + Y_l \right) \right\} n^2 V_M^2 \quad (3)$$

계통의 동특성에 의하여 계산된 부하모선 전력방정식(3)의 결과로부터 모선전력이 계산 된다. 이렇게 계산된 모선전력으로부터 조류계산 식(1-2)을 만족하여야 공급곡선과 부하곡선이 일치하는 실제 운전가능한 운전점을 찾을 수 있다.

동적 모델:

$$\frac{ds_k}{dt} = \frac{1}{T_{k0}} \left( \frac{P_{m_k} - P_{e_k}}{1 - s_k} - P_{e_k} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dB_{SVC_k}}{dt} = \frac{1}{T_{SVC}} (V_D - V_{REF}) \quad (5)$$

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{T_{TAP}} (n_k V_D - V_{REF}) \quad (6)$$

계통에 외란이 발생하게 되면 계통의 평형이 깨어지고, 계통의 동적 특성에 따라서 운동을 하게 된다. 식(4)는 유도전동기의 동적 특성을, 식(5)는 SVC의 동적 특성을, 식(6)은 OLTC의 동적 특성을 나타낸 동적 방정식이다. 따라서 외란이 발생한 T시간에서의 계통은 식(4-6)에 나타난 동적 방정식으로부터 결정된 상태변수값 으로부터 식(3)의 모선전력이 계산되어지며, 이렇게 계산된 모선전력은 부하곡선상에서 존재하는 값이며, 실제의 운전점은 전력을 공급하는 공급곡선(P-V곡선)과 부하곡선이 만나는 점에서 결정된다.

#### 2.2 부하모델

동적전압안정도를 해석하는데 있어서 부하모델은 상당히 중요한 부분을 차지하고 있으며, 본 연구에서 사용한 유도기 모델의 파라메타를 구하는 문제는 간단하게 결정될 문제가 아니다. 근본적으로 부하의 유도기모델을 사용하였으므로 해당모선의 유도기 파라메타를 측정하거나 계산을 하여야 하는데, 이는 현실적으로 상당히 까다로운 문제에 접하게 된다. 실제로 현재의 부하모선에 등가 유도기모델의 파라메타를 측정하기가 곤란하므로 유도기의 파라메타는 주어진 조류계산의 입력 데이터로부터 계산하는 방법이 현실적으로 가능한 방법으로 생각된다.

- 등가 파라메타의 계산

[13]의 유도전동기 출력식 으로부터 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{P_D}{\frac{R_m}{s}} = \frac{1}{\left(\frac{R_m}{s}\right)^2 + X_m^2} V_D^2 \quad (7)$$

$$\frac{Q_D}{\frac{X_m}{s}} = \frac{1}{\left(\frac{R_m}{s}\right)^2 + X_m^2} V_D^2 \quad (8)$$

$P_D$ : 유도부하의 유효전력  
 $Q_D$ : 유도부하의 무효전력  
 $R_m$ : 등가회로의 저항성분  
 $X_m$ : 등가회로의 리액턴스  
 $s$ : 슬립(평형슬립)  
 $V_D$ : 모션전압

식(7)와 (8)의 우변이 같으므로 유효전력과 무효전력은 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{P_D s}{R_m} = \frac{Q_D}{X_m} \quad (9)$$

식(9)로부터 정리하면 식(10)이 된다.

$$R_m Q_D = s X_m P_D \quad (10)$$

식(10)을  $R_m$ ,  $X_m$  으로 정리하면 식(11)(12)식이 된다.

$$R_m = \frac{X_m s P_D}{Q_D} \quad (11)$$

$$X_m = \frac{Q_D}{s P_D} \quad (12)$$

따라서 유도기의 등가 파라메타는 식(11-12)의 관계를 이용하여 계산할 수 있다.

### 2.3 제어기 모델

식(3-6)에 나타나 있는 제어기의 동적 특성은 부하 모션의 전압에 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 요소들이다. 또한 식(3-6)의 시정수에 의해서 계통의 동적 특성이 영향을 받는다. 그러므로 동적요소들의 시정수를 적절히 고려해야만 실제와 같은 결과를 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 제어기들의 시정수를 결정하는데 상대적인 시정수를 사용하였다. 일반적으로 SVC는 상당히 빠르게 동작하는 제어기로서 동적 전압안정도 해석에 있어서 동적 요소로서 취급할 필요가 없으나, SVC의 투입량에 따라서 계통의 상태가 변화하므로 SVC투입량을 계산하기 위하여 동적 모델을 사용하였다. OLTC의 경우는 탭과 탭사이를 기계적으로 이동 시키므로써 썬치의 발생과 계통의 동요를 억제하기 위해 상당히 늦은 속도로 움직인다. 따라서 계통의 동적 요소 중 OLTC의 시정수가 가장 느리며, 유도전동기는 회전자 판성 뿐만 아니라 기계적 부하의 판성까지도 포함되어 있으므로 상당히 큰 시정수를 가진다. 따라서 본 논문에서는 OLTC의 시정수를 1.0으로 가정 하였으며, 유도기는 0.3, SVC는 0.1의 시정수를 사용하였다. 이렇게 결정된 시정수는 정확한 값은 아니나 계통의 실제적인 동적 특성을 표현하는데 필요한 것이며, 동적 전압안정도의 실제적인 운동을 추적할 수 있도록 하기 위함이다.

### 2.4 계통 안전성 평가

계통의 동적 전압안전성을 평가하기 위해서는 계통의 모든 모션에서의 외란에 대하여 동적 전압안정도가 확보되는지를 평가하여야 한다. 따라서 모션의 사고, 선로의 사고, 부하의 변동 등에 대하여 계통이 안정한가를 계산하여야 한다.

#### · 사고에 대한 안전성 평가

- 발전모션 사고
- 부하모션 사고
- 선로 사고

#### · 부하변동에 의한 안전성 평가

- 유도기 부하의 변화
- 임피던스 부하의 변화
- 콘덴서 뱅크의 변화

### 2.5 사례연구

실계통 적용에 사용된 데이터는 483모션 867선로의

계통으로서 초기조류계산 결과 유효전력 부하는 2220만 KW이며, 무효전력 부하는 370만 KVAR 이다. 부하모델은 유도기와 임피던스 부하가 복합되어 있는 경우로써 유도기 부하가 50%인 경우에 대하여 계산을 하였다. 이때 사용된 유도전동기의 평형슬립은 0.01로 가정 하였다. 실제 유도전동기의 슬립은 전기적 입력과 기계적 출력의 차이로 발생하는 손실이다. 정상상태 즉, 초기조류계산시의 부하모션에 연결된 유도기부하의 손실이 1%인 경우에 대하여 계산을 하였다.

전압안전성을 평가하기 위하여 모션의 유도부하가 증가한 경우와 임피던스 부하가 증가한 경우를 계산 하였다. 전압안전성 평가에 선택된 모션은 전압붕괴 근접도 지표값이 가장 큰 모션인 128번 모션을 선택 하였다. 또한 인접모션의 영향을 평가하기 위하여 129번 모션의 결과도 함께 나타내었다.

#### - 유도전동기의 기계적 출력 증가에 의한 동적 전압붕괴

유도전동기의 기계적 출력의 증가로 인하여 유도전동기 출력이 증가한 모션 뿐만 아니라 인접모션까지도 전압붕괴로 이어지는 결과를 그림 1-2에 나타내었다.

128번모션유도 전동기의 기계적 출력을 0.1만큼 증가시킨 경우의 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 인접모션인 129번 모션의 결과를 나타내었다.

그림 1-2의 경우에 OLTC를 투입한 결과를 그림 3-4에 나타내었다. 이때 OLTC의 상한값은 1.25이며, 하한값은 1.0으로 하였다. 결과적으로 OLTC를 투입함으로써 계통의 동적 전압붕괴가 예방됨을 알 수 있다.

그림 1-2의 경우에 SVC를 투입한 결과를 그림 5-6에 나타내었다. 이때 SVC의 상한값은 0.5이며, 하한값은 0.0으로 하였다.

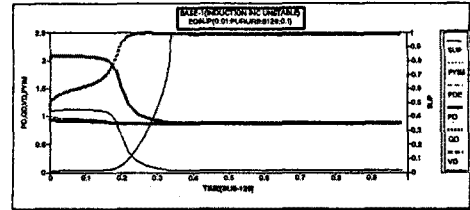


그림1 128번모션(BASE)

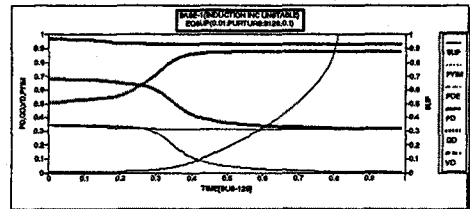


그림2 129번모션(BASE)

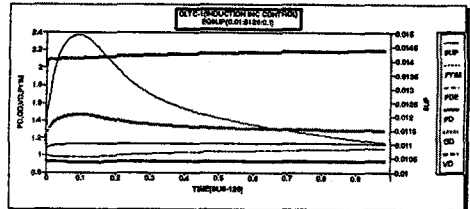


그림3 128번모션(OLTC)

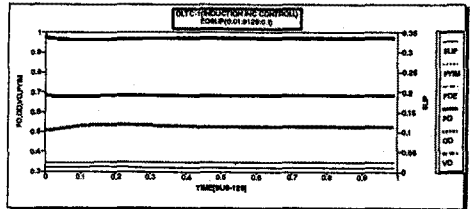


그림4: 129번모션(OLTC)

### 3. 결 론

계통의 동적 전압안정도 평가를 위한 유도전동기 부하변동을 본 논문에서는 기계적 출력의 변동으로 계산을 하였다. 그러나 계산결과에서도 알 수 있듯이 유도전동기의 기계적 출력의 변화는 실제 계통의 부하를 표현하는데 한계가 있다. 부하모션에서의 유도기부하증가는 단순히 기계적 출력의 증가만을 포함 하는것은 아니다. 실제 부하모션에서의 부하증가는 유도전동기가 병렬로 늘어남으로써 발생하는 것이 대부분이다. 따라서 부하모션의 유도기부하 증가를 유도기의 병렬연결로써 계산하는것이 실제의 계통을 보다 잘 표현 한다고 할 수 있다.

계통의 동적 전압안정성을 평가하기 위해서는 계통의 모든 모션에서의 외란에 대하여 동적 전압안정도가 확보되는지를 평가하여야 한다. 실제계통 적용에 있어서의 어려움이 여기에 있다. 모든 모션에서의 각각의 외란으로부터 안정한가를 평가하기 위해서는 막대한 시간이 소요되며, 상정사고 해석의 경우보다도 훨씬 많은 경우에 대하여 계산을 하여야 한다. 따라서 효과적인 계산을 위하여 모든모션에 대하여 안전성을 평가하는 것이 아니라 적당한 방법으로 선택된 모션에 대하여 안전성을 평가하는것이 바람직 하다고 생각된다. 본 논문에서는 이러한 모션의 선택방법을 다음과 같이 제안한다.

- 계통의 사고확률이 높은 모션이나 선로의 선택
- 정적 전압안정도 측면에서 취약모션의 선택
- 전압이 낮은 모션의 선택
- 부하밀도가 높은 모션의 선택

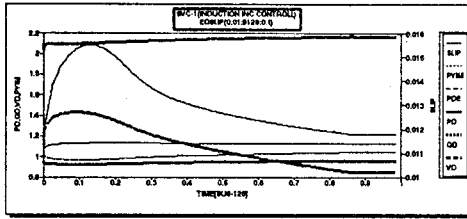


그림5 128번모션(SVC)

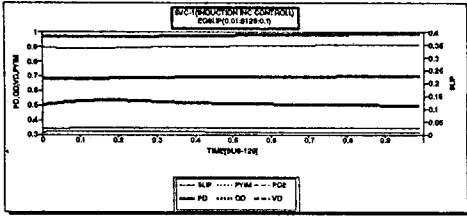


그림6 129번모션(SVC)

#### - 임피던스 부하증가에 의한 전압붕괴

부하모션의 임피던스 부하 증가로 인하여 동적전압 붕괴로 가는 결과를 그림 7-8에 나타내었다. 이때의 임피던스 부하 변동은 유효전력 0.8 무효전력 0.8을 증가시켰다.

그림 7-8의 경우에 OLTC를 투입한 결과를 그림 9-10에 나타내었다. 이때 OLTC의 상한값은 1.25이며, 하한값은 1.0으로 하였다. 결과적으로 OLTC를 투입함으로써 계통의 동적 전압붕괴가 예방됨을 알 수 있다.

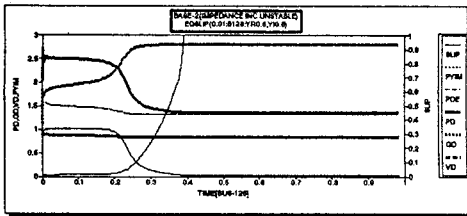


그림7 128번모션(BASE)

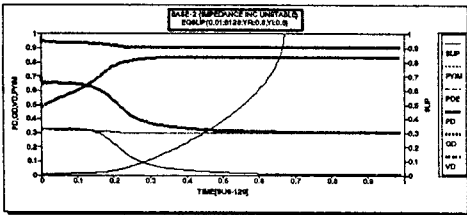


그림8 129번모션(BASE)

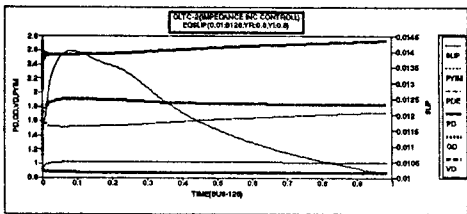


그림9 128번모션(OLTC)

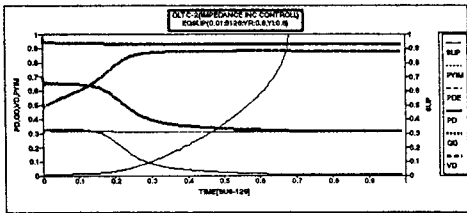


그림10 129번모션(OLTC)

#### 참고문헌

- [1] 김건중, 김원경, 정태호, 이상중, "전압안정도 개선을 위한 무효전력제어" 대한전기학회 학계학술대회 논문집, 1991.7.
- [2] CHEN-CHING LIU, "Analysis of Tap-Changer Dynamics and Construction of Voltage Stability Regions" IEEE Transactions on CIRCUIT AND SYSTEMS, Vol.36, No.4, April 1989, P 575-590
- [3] Yasuji Sekine, "CASCADED VOLTAGE COLLAPSE" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.1, February 1990, P 250-256
- [4] 김건중, 추진부, 김원경, 이상중, 김용배 "무효전력손실감도도 이용한 전압 붕괴 근정도 지표" 대한 전기학회 학계학술대회 1992.7
- [5] Y. Tamura, "RELATIONSHIP BETWEEN VOLTAGE INSTABILITY AND MULTIPLE LOAD FLOW SOLUTIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.5, May 1983, P 1115-1125
- [6] C. Lemaire, "AN INDICATOR OF THE VOLTAGE PROFILE INSTABILITY FOR REAL-TIME CONTROL APPLICATIONS" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.1, February 1990, P 154-161
- [7] Christopher L. DeMarco, "AN ENERGY BASED SECURITY MEASURE FOR ASSESSING VULNERABILITY TO VOLTAGE COLLAPSE" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.2, May 1990, P 419-427
- [8] Hiroshi Ohtsuki, "REVERSE ACTION OF ON-LOAD TAP CHANGER IN ASSOCIATION WITH VOLTAGE COLLAPSE" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.1, February 1991, P 300-306
- [9] Byung Ha Lee, "A STUDY ON VOLTAGE COLLAPSE MECHANISM IN ELECTRIC POWER SYSTEMS" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.3, August 1991, P 966-974
- [10] Thomas J. Overbye, "IMPROVED TECHNIQUES FOR POWER SYSTEM VOLTAGE STABILITY ASSESSMENT USING ENERGY METHODS" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No. 4, November 1991, P1446-1452
- [11] Ian Dobson, "Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electrical" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.39, No.3, March 1992, P 240-243
- [12] Tay H. Jung, Kern J. Kim, Fernando L. Alvarado, "A Marginal Analysis of The Voltge Stability with Load Variations", Proceedings of 10th PSCC Conference, Graz, Austria, Aug, 1990.
- [13] 김용배, 김건중, 김원경, 추진부, 이상중, "유도기모델을 사용한 동적 전압안정도 해석", 대한 전기학회 춘계 학술연구 발표회 전력계통분야, 1993.5.1, P 30-34.