

모드 해석을 이용한 수도권 FACTS 설비 설치 후보지 선정

이정호, 김학만, 국경수, 오탁규  
한국전기연구원

Selection of Installing Sites for FACTS  
in the Capital System Using Modal Analysis

J.H. Lee, H.K. Kim, K.S. Kook, T.K. Oh  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 본 논문은 수도권 지역계통의 전압안정도 향상을 위한 FACTS 설비의 설치 위치를 선정하기 위해 전압-무효전력의 감도를 이용한 모드 해석(Modal Analysis) 방법의 적용 사례를 제시한다. 적용 사례는 우리나라 전력계통의 2007년, 2008년, 2009년, 2010년의 부하수준별 수도권의 중요 345kV 송전선로 상정 사고시 모드 해석 결과에 의해 각 모드별 모션 참여율을 구해 가장 효과적인 FACTS 설비 설치 후보지를 도출하였다.

1. 서 론

전력계통의 다양한 운전조건에서 전압안정도 유지는 계통의 운영 및 계획 측면에서 주요 고려사항이며 전압 붕괴 예측, 안정도 여유 계산, 전압 취약 개소 확인, 제어 민감도 계산 등을 할 수 있는 해석적 수단으로 사용된 것이 모드 해석이다. 특히 전압-무효전력 특성에 의한 자코비안 행렬을 모드 해석에 이용하여 전압안정도 여부를 판단하였다. 만약 계통의 모든 모션에 대하여, 한 모션에 무효전력 주입을 증가시켰을 때 동일 모션의 전압크기가 증가하면 계통은 전압안정이고 만약 계통 내 적어도 한 모션에서, 한 모션의 무효전력 주입을 증가시켰을 때 동일 모션의 전압크기가 감소하면 계통은 전압 불안정이라는 개념이 적용되었다.

본 논문은 수도권 지역계통의 전압안정도 향상을 위해 가장 효과적인 FACTS 설비의 설치 위치를 선정하도록 모드 해석 방법을 적용 분석한 사례를 제시한다. 전압-무효전력의 감도를 이용하여 해석적으로 접근하는 모드 해석 방법은 Kundur에 의해 대형계통의 전압안정도 해석에 처음으로 적용되었다. 모드 해석 방법은 전압-무효전력 감도를 표현하는 자코비안(Jacobian) 행렬의 고유치와 고유벡터를 계산하여 고유치에 따라 계통이 전압불안정 가능성이 있는 모드를 찾아낸다. 이를 이용하여 모션에 무효전력을 공급하여 전압안정도 향상에 가장 크게 기여할 수 있는 모션을 찾아내는 것이 참여율(participation factor) 계산이다. 본 논문에서는 모드 해석을 통한 모션 참여율 계산으로 우리나라 전력계통의 2007년, 2008년, 2009년, 2010년의 부하수준(70%, 80%, 90%, 100%)에서 수도권의 중요 345kV 송전선로 상정 사고시 모드 해석 결과에 의해 각 모드별 모션 참여율을 구해 가장 효과적인 FACTS 설비 설치 후보지를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 모드 해석

정상상태에 대해 선형화된 전력조류 방정식이 다음 식(1)과 같을 때,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 유효전력 변화를 고려하지 아니하여  $\Delta P=0$  이라고 하면

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \Delta V = J_R \Delta V \quad (2)$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (3)$$

단,  $J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}]$

이 되는데 여기서  $J_R$ 을 모션 전압의 크기 변화와 모션의 무효전력 주입량 변화간의 관계를 나타내는 reduced Jacobian 행렬이라고 한다. 이러한 자코비안  $J_R$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (4)$$

여기서,

- $\xi = J_R$ 의 우고유벡터 행렬
- $\eta = J_R$ 의 좌고유벡터 행렬
- $\Lambda = J_R$ 의 Diagonal 고유치 행렬

여기서,  $J_R$ 의 역행렬을 구하면

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (5)$$

이 되고, (3)과, (5) 식으로부터

$$\Delta V = \sum \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (6)$$

이 된다. 여기서,

- $\lambda_i = J_R$ 의  $i$  번째 고유치
- $\xi_i$ 는  $J_R$ 의  $i$  번째 열의 우고유벡터
- $\eta_i$ 는  $J_R$ 의  $i$  번째 행의 좌고유벡터이다.

이러한 각 고유치  $\lambda_i$ 와 이에 대응하는 좌, 우고유벡터  $\xi_i, \eta_i$ 가 계통의 V-Q 관계에 관련하는  $i$ 번째 모드를 정의한다. 여기서,  $i$ 번째 모드의 무효전력 변화 분은 다음과 같다.

$$\Delta Q_{mi} = K_i \xi_i \quad (7)$$

단,  $\xi_{ji}$ 가  $\xi_i$ 의  $j$ 번째 값일 때  $K_i = \sum_j \xi_{ji}^2 = 1$  이다. 따라서, 대응하는  $i$ 번째 모드의 전압 변화 분은 다음과 같다.

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_{mi} \quad (8)$$

식(7), (8)로부터  $\lambda_i < 0$  인 경우는 V-Q 감도가 음이 되어 계통은 불안해지며  $\lambda_i > 0$  인 경우는 V-Q 감도가 양이 되어 계통은 안정해 짐을 알 수 있다. 또한, 이때 전압 변화분의 크기는 i번째 고유치의 역수에 해당하는 크기로 증폭됨을 알 수 있다. 이러한 관점에서 각 고유치  $\lambda_i$ 의 크기가 이에 대응하는 모드 전압의 취약정도(weakness)를 결정하게 된다. 즉,  $\lambda_i$ 의 크기가 작을수록 이에 대응하는 모드 전압은 더 불안해진다. 따라서 모드 해석은 이러한  $\lambda_i$ 를 계산하여 계통의 안정도를 해석하게 된다.

모드 i에 대한 k 모선의 참여율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (9)$$

즉,  $P_{ki}$ 는 k모선에서의 V-Q 감도에 대한 i번째 고유치의 공헌을 나타내며, 모선 참여율의 크기는 해당 모드를 안정화하는데 해당 모선에 적용된 전압 제어의 효과를 나타낸다.  $J_r$ 의 고유치를 대형계통에서 모두 구하는 것은 현실적으로 불필요하며 가장 중요한 5개 정도의 모드를 찾는 것이 일반적이다.

## 2.2 모드 해석 사례

모드 해석을 통한 수도권 FACTS 설비 설치의 최적 위치 선정은 2007년부터 2010년까지 각 부하수준별(60%, 70%, 80%, 90%, 100%) 우리나라 계통을 대상으로 수도권지역 상정사고에 대해서 조류계산이 수렴하도록 작성된 제약 급전 조건으로 하였다. 모드 해석 결과에 의한 모선 참여율에 대한 효과는 PowerTech사 안전도 해석 소프트웨어인 DSA (Dynamic Security Assessment) 패키지의 VSAT을 이용하여 표 1. 모드 해석 적용 상정사고인 수도권 주요 상정사고에 대해 계산하였다.

표 1. 모드 해석 적용 상정사고

해석년도	모드 해석 적용 상정사고
2007년	양주 - 서인천 345 kV 송전선로 2회선 차단 상정사고
2008년	신파주 - 서인천 345 kV 송전선로 2회선 차단 상정사고
2009년	신파주 - 서인천 345 kV 송전선로 2회선 차단 상정사고
2010년	신파주 - 서인천 345 kV 송전선로 2회선 차단 상정사고

### 2.2.1 년도별 모드 해석 주요 결과

2007년 90% 부하수준 계통에 대한 모드 해석 결과, 고유치가 0.012674인 모드가 영향력이 큰(dominant) 모드이며, 해당 모드에서의 모선 참여율은 그림 1과 같이 그래프에 표시하였다. 이 모드를 개선시키기 위해서는 1400 번대 모선, 1800 번대 모선, 1900번대 모선에서 무효전력을 보상하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

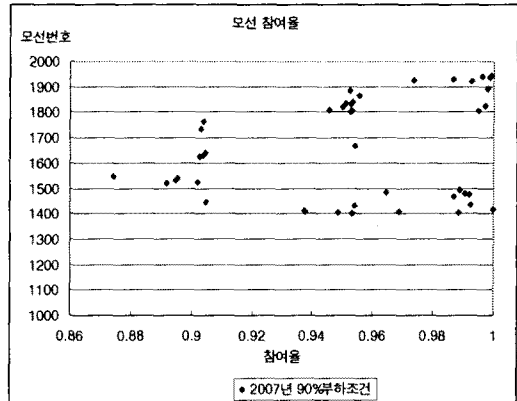


그림 1. 2007년 90% 부하시 모선참여율

그림 2는 2008년 90% 부하수준 계통조건에 대한 모드 해석 결과에 의해 영향력이 큰 모드의 모선 참여율을 표시하고 있다. 고유치가 0.026344인 모드가 영향력이 큰(dominant) 모드이며, 그림에서 보는 바와 같이 1400 번대 모선, 1800 번대 모선, 1900번대 모선의 참여율이 큰 것으로 보이며 모드의 개선은 1400 번대 모선, 1800 번대 모선, 1900번대 모선의 무효전력보상이 효과적인 것으로 분석된다

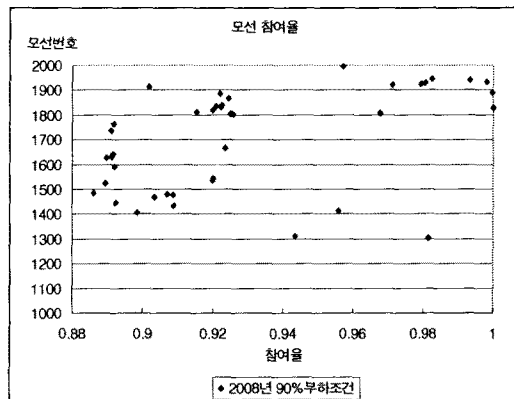


그림 2. 2008년 90% 부하시 모선참여율

2009년 80% 부하수준 계통에 대한 모드 해석 결과에 의하면 영향력이 큰(dominant) 모드는 0.092221인 모드이며, 그림 3은 해당 모드의 모선 참여율을 5각 모선번호별로 표시하고 있다. 이 모드를 개선시키기 위해서는 발전기 모선을 제외하고는 1400 번대 모선, 1800 번대 모선, 1900 번대 모선에 무효전력을 보상하기 위한 설비를 설치하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

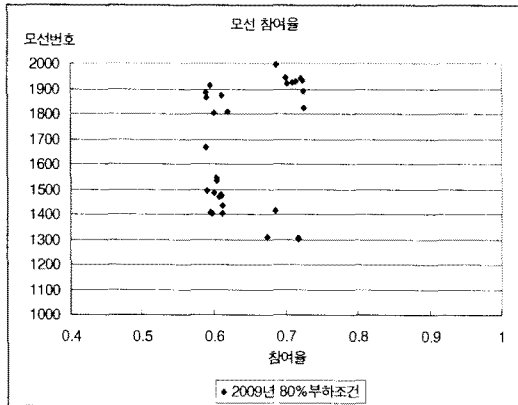


그림 3. 2009년 80% 부하시 모선참여율

2010년 Peak 계통에 대한 모드 해석 결과에 따라 0.005354인 모드가 영향력이 큰(dominant) 모드임을 알 수 있었다. 해당 모드의 모선번호별 모선 참여율은 그림 4에 표시하였다. 해당 고유치를 개선시키기 위해서는 1400번대, 1500 번대 모선의 무효전력보상이 효과적인 것으로 판단되었다.

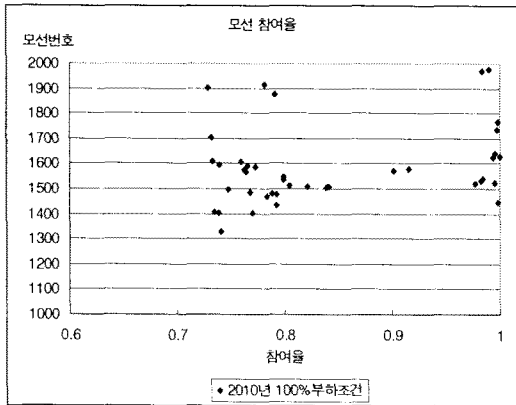


그림 4. 2010년 100% 부하시 모선참여율

위의 사례에서 영향력이 큰 모드에서 발전기 모선을 제외한 부하모선에서의 5개의 최대크기 모선 참여율은 다음 표와 같다.

표 2. 영향력이 큰 모드의 최대 참여율

2007년 90%부하		2008년 90% 부하	
고유치=0.026344		고유치=0.012674	
모선	참여율	모선	참여율
1415	1	1825	1
1945	0.99929	1890	0.99979
1935	0.99866	1935	0.99807
1890	0.99816	1940	0.9932
1825	0.99724	1945	0.98257

2009년 80% 부하		2010년 100% 부하	
고유치=0.005354		고유치=0.092221	
모선	참여율	모선	참여율
1890	0.72457	1630	1
1825	0.72449	1445	0.99881
1935	0.72391	1765	0.99848
1940	0.72126	1735	0.99775
1302	0.71833	1525	0.99551

### 3. 결 론

본 논문에서는 수도권 안정도 향상을 위해 효과적인 FACTS 설비 설치 후보지를 검토하기 위해 모드 해석을 수행하였다. 모드 해석으로부터 발전기 모선을 제외한 부하모선에서는 1400번대(양주 345 kV 변전소의 154 kV 이후단 모선), 1500번대(의정부 345 kV 변전소의 154 kV 이후단 모선), 1800번대(중부 345 kV 변전소의 154 kV 이후단 모선), 1900번대(양주 345 kV 변전소의 154 kV 이후단 모선) 모선이 모선 참여율이 높아 무효전력을 보상하기에 적합하며 수도권 지역 전압안정도를 개선시키기 위해 FACTS 설비를 설치에 효과적인 위치로 도출되었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] B. Gao, G.K. Morison, P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 4, 1529 ~ 1542.
- [3] B. Porter, "Modal Control Theory and Applications", Taylor and Francis Ltd., 1972.
- [4] PowerTech, "VAST User's Manual Version 3.0", 2003.