

Modular 네트워크 모델 구성에 의한 전력계통 SSR 현상의 고유치해석

論文

48A-10-9

Eigen-analysis of SSR in Power Systems with Modular Network Model Equations

南海鯤* · 金容求** · 沈冠植***

(Hae-Kon Nam · Yong-Gu Kim · Kwan-Shik Shim)

Abstract - This paper presents a new algorithm to construct the modular network model for SSR analysis by simply applying KCL to each node and KVL to all branches connected to the node sequentially. This method has advantages that the model can be derived directly from the system data for transient stability study and turbine/generator shaft model, the resulted model in the form of augmented state matrix is very sparse, and thus efficient SSR study of a large scale system becomes possible. The proposed algorithm is verified with the IEEE First and Second Benchmark models.

Key Words : subsynchronous resonance, eigen-analysis, series capacitor compensation, modular network model, synchronous machine, turbine/generator shaft model

1. 서론

최근 전력수요가 지속적으로 증가하는데도 새로운 송전 설비의 건설이 어려워지는 사회적 환경에 의해 기존 송전시설을 최대한 활용하여 전력계통을 보다 경제적으로 운전하면서, 동시에 안정도와 신뢰도를 확보하여야 하는 필요성이 대두되고 있다. 직렬 캐패시터 보상은 중장거리 선로의 리액턴스를 감소시켜 송전능력, 과도안정도/전압안정도를 향상시키고 병렬선로간의 조류 제어를 가능하게 하는 등 경제성과 효율성이 뛰어나 현재 많은 실계통에 투입되고 있고 [1], 최근 능동적인 유연 AC 송전계통 (Flexible AC Transmission System, FACTS)의 도입도 활발히 추진되고 있다 [10]. 그러나 송전선로를 직렬 보상하는 경우 네트워크가 터빈-발전기 축의 기계적 시스템과 상호작용을 일으켜 계통주파수보다 낮은 한 개 또는 그 이상의 주파수에 고유 주파수를 형성하고 에너지를 교환하여 터빈/발전기의 축에 비틀림 진동 (torsional oscillation)을 유발할 수도 있다 [1-4]. 이 subsynchronous resonance (SSR) 현상에 의한 축의 비틀림 진동은 축에 피로를 누적시키고 심한 경우 터빈/발전기 축이 깨지는 치명적 사고로 이어질 수 있다. 실제로 1970년과 1971년 미국 Nevada 남부의 Mohave 발전소에서 축이 깨지는 사고가 발생하였고, 이후 SSR에 관한 많은 연구가 있었다 [5,6]. 따라서 전력계통에서 송전용량의 증대와 안정도 향상을 위해 직렬 캐패시터 보상을 계획할 때는 반드시 SSR 현상에 대한 해석과 대책이 선행되어야 할 것으로

생각된다.

SSR 현상은 발생원인과 진행과정에 의해, 1) 터빈-발전기 축의 기계적 비틀림 특성과는 무관하고 전기적 시스템에만 관련된 유도발전기 효과 (induction generator effect); 2) 전기적 시스템과 기계적 시스템사이의 상호작용에 의한 비틀림 상호작용 (torsional interaction); 3) 직렬 보상된 송전계통에 외란이 인가되는 경우 발전기 회전자에 발생하는 과도토크가 직렬 캐패시터가 없는 계통에서 3상고장으로 인한 토크보다 훨씬 큰 값을 갖게되는 과도토크증폭 (transient torque amplification)으로 분류된다 [2-4]. 유도발전기 효과와 비틀림 상호작용에 의한 SSR 현상은 SSR의 원인으로 작용하는 외란의 크기가 비교적 작아 SSR 해석에 선형모델의 사용이 가능하나, 토크증폭의 경우 외란이 매우 크므로 비선형 모델을 사용하여야 한다. 따라서 유도발전기 효과나 비틀림 상호작용에 의한 SSR 해석은 주파수탐색과 고유치해석 등 선형계통 해석방법에 의해 수행될 수 있으며, 토크증폭은 EMTP 등 비선형 모델의 시뮬레이션에 의해서 수행된다. 주파수탐색은 특정 발전기의 고정자권선에서 바라본 네트워크의 임피던스를 주파수 함수로 계산하고, 네트워크에 축의 비틀림 고유주파수와 근접한 직렬공진이나 리액턴스의 최소 값이 있으면 비틀림 상호작용이나 토크 증폭현상에 의한 SSR 가능성이 있다. 이 방법은 빠르고 사용이 간편하여 SSR의 발생가능성에 대한 기초 조사 방법으로 적합하지만 해석 범위가 특정 발전기에 국한되고 계통조건이 변할 때마다 다시 계산해야하는 단점이 있다.

고유치해석에서 고유치는 진동의 감쇠정도와 진동주파수, 우고유벡터는 각 상태변수가 특정 모드에 영향받는 정도를 나타내며 좌고유벡터는 우고유벡터와 함께 각종 감도해석을 가능하게 하는 등 잘 개발된 선형시스템 이론을 사용하는 장점이 있다. 현재 SSR현상의 고유치해석을 위한 프로그램으로 SSR/EIGEN이 [2] 보고되고 있는데, 이 방법에서

* 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 博士課程 修了

*** 正 會 員 : 西南大 工大 電子電氣工學部 專任講師 · 工博

接受日字 : 1999年 6月 23日

最終完了 : 1999年 9月 2日

는 네트워크 상태방정식의 형성에 일반적인 회로의 상태방정식을 유도하도록 설계된 CORNAP (Cornell Network Analysis Program) 프로그램을 사용하고 있다. 전력계통 네트워크는 일반 회로와는 달리 매우 단순한 구조를 갖는다. 거의 모든 회로 요소는 모선과 모선을 연결하는 변압기와 송전선로로 구성되고, 이들 요소는 반드시 인덕턴스를 포함한다. 또한, 회로방정식을 루프 방정식보다는 마디방정식 형태로 표현하는 것이 편리한 구조를 가지며, 그 마디 방정식은 매우 스파스한 형태를 취한다. CONRAP을 사용하여 이러한 전력계통 네트워크의 특성을 활용하지 못하는 SSR/EIGEN은 필요이상으로 복잡하고, 스파시티를 고려하지 않으므로 해석할 수 있는 상태행렬의 크기가 700차 정도의 중저차 계통으로 한정되는 단점이 있다. 또한 확대행렬과 스파시티 기법을 사용한 발전기/터빈 및 네트워크 정수의 변화에 대한 감도해석 등 좀더 발전적인 프로그램의 개발이 제한된다 [11].

전력계통의 특성을 반영한 네트워크 방정식의 형성 방법이 개발되면 SSR 현상의 고유치해석은 좀더 효율적으로 수행될 수 있다. 또한, SSR 해석을 위해 별도로 데이터를 준비하기보다는 과도안정도 해석을 위한 기기/네트워크 데이터를 그대로 사용하고 여기에 발전기/터빈 측 데이터 등 SSR 해석에 필요한 최소한의 데이터만을 추가하고, 모델을 스파시티기법의 사용이 가능한 확대행렬의 형태로 표현하여 대규모 계통에도 적용이 가능하고 계산상의 효율을 높이는 것도 중요하다. 본 논문에서는 이러한 기능을 충족하는 SSR 현상의 고유치 해석법을 개발하기 위하여, 전력계통의 특성을 활용한 modular 네트워크 상태방정식의 구성방법을 제시한다. 이 방법에서는 각 마디에 키르호프 전류법칙 (KCL) 그리고 그 마디에 연결된 모든 지로에 키르호프 전압법칙 (KVL)을 적용하여, 마디를 방정식 형성의 모듈 (module) 단위로 하여 네트워크 방정식을 체계적으로 얻는다. 논문의 원활한 흐름을 위하여 발전기/터빈의 모델을 요약한 후에, 네트워크 방정식의 구성방법, IEEE의 First Benchmark Model (FBM)과 Second Benchmark Model (SBM)에 적용한 사례를 기술한다.

2. 발전기/터빈 모델

2.1 발전기 전압방정식 [1, 2]

발전기/터빈 모델은 이미 잘 정립되어 있으므로 [1,2] 간략히 기술한다. 그림 1은 각 변수를 단위 값 (per unit, pu)으로 나타낸 직축과 횡축 (dq-축)의 동기기 등가회로를 보여주고 있다. 그림에서 첨자 d와 q는 각각 고정자권선의 직축과 횡축을 의미하고, F와 D는 각각 직축의 회전자 계자 권선과 제동권선, 그리고 G와 Q는 횡축의 두개의 회전자 제동권선을 나타낸다.

동기기의 전압방정식은 다음과 같다 [1].

$$\frac{1}{\omega_B} p \lambda_d = -\omega \lambda_q - r_a i_d - v_d \quad (1)$$

$$\frac{1}{\omega_B} p \lambda_F = -r_F i_F + v_F \quad (2)$$

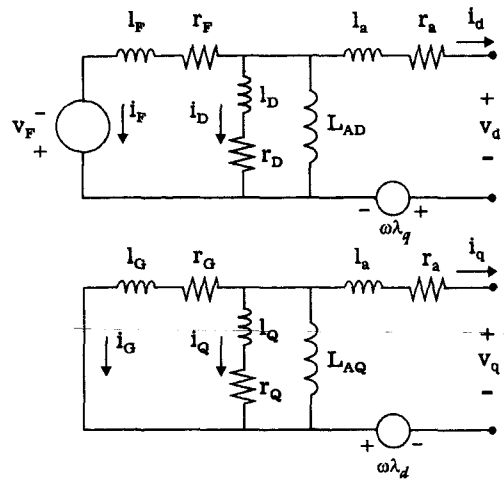


그림 1 동기기 등가회로

Fig. 1 Two-axis equivalent circuits for synchronous machine

$$\frac{1}{\omega_B} p \lambda_D = -r_D i_D \quad (3)$$

$$\frac{1}{\omega_B} p \lambda_q = -r_a i_q - \omega \lambda_d - v_q \quad (4)$$

$$\frac{1}{\omega_B} p \lambda_G = -r_G i_G \quad (5)$$

$$\frac{1}{\omega_B} p \lambda_Q = -r_Q i_Q \quad (6)$$

위에서 p 는 미분연산자, λ 는 쇄교자속, ω_B 는 동기각속도를 나타낸다. 전류와 상태변수인 쇄교자속 사이에는 다음과 같은 선형관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_G \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & L_{AD} & L_{AD} & 0 & 0 & 0 \\ L_{AD} & L_F & L_{AD} & 0 & 0 & 0 \\ L_{AD} & L_{AD} & L_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & L_{AQ} & L_{AQ} \\ 0 & 0 & 0 & L_{AQ} & L_G & L_{AQ} \\ 0 & 0 & 0 & L_{AQ} & L_{AQ} & L_Q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_q \\ \lambda_G \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)을 (1)-(6)에 대입하여 선형화 하면 쇄교자속을 상태변수로 하는 동기기의 선형상태방정식을 얻을 수 있다.

2.2 기계기준축 전압/전류의 계통기준축으로의 변환

식 (1)과 (4)에서 기계기준축으로 표현된 발전기 단자전압 v_d, v_q 와 고정자전류 i_d, i_q 는 네트워크 방정식의 유도에 사용된다. 발전기의 상태방정식과 네트워크 방정식을 통합하기 위해서는 발전기와 네트워크를 연결하는 발전기 단자전압과 고정자 전류를 계통기준축인 RI-축으로 변환하여 사용하는 것이 더 편리하다[12]. 기계기준축 전압/전류를 RI-축으로 변환하기 위해서, 먼저 두 기준축 사이의 관계를 그림 2와 같이 회전자의 q-축이 RI-축의 R-축보다 발전기

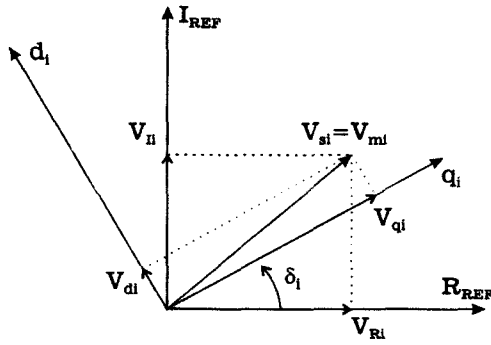


그림 2 기계기준축과 계통기준의 정의
Fig. 2 Two reference frames for a machine quantity

토크 각 δ 만큼 앞서고 d-축은 q-축보다 위상이 90° 앞서는 것으로 정의한다.

이 정의에서 기계기준축 전압과 RI-축 전압사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_I \\ V_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 식을 선형화 하면

$$\begin{bmatrix} \Delta v_d \\ \Delta v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_o & -\sin \delta_o \\ \sin \delta_o & \cos \delta_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \Delta V_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{d0} \\ -v_{q0} \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (9)$$

전류의 경우도 이와 동일하게

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_o & -\sin \delta_o \\ \sin \delta_o & \cos \delta_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_I \\ \Delta I_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{d0} \\ -i_{q0} \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (10)$$

2.3 회전자의 축 운동방정식

그림 3은 고압터빈 (HP), 중압터빈 (IP), 2개의 저압터빈 (LPA 및 LPB), 발전기 (GEN) 그리고 여자기 (EXC)로 구성된 발전기/터빈의 축 모델을 보여주고 있다.

축의 운동방정식에 관한 모델은 문헌 [2]에 상세히 기술되어 있으므로 여기서는 결과만을 간략히 기술한다. 회전체 i 의 운동방정식은

$$2H_i \Delta \dot{\omega}_i = \Delta T_{mi} - \Delta T_{ei} - D_i \Delta \omega_i + K_{(i-1),i} \Delta \delta_{i-1} - (K_{(i-1),i} + K_{i,(i+1)}) \Delta \delta_i + K_{i,(i+1)} \Delta \delta_{i+1} \quad (11)$$

$$\Delta \dot{\delta}_i = \omega_B \Delta \omega_i \quad (12)$$

위에서,

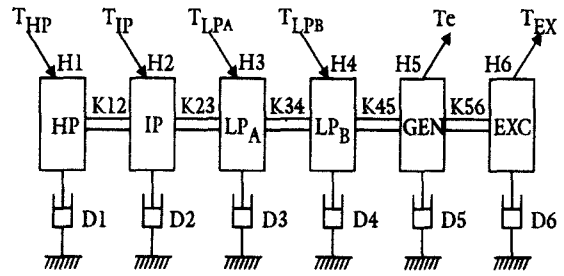


그림 3 터빈-발전기 축모델
Fig. 3 Turbine-generator shaft model

T_{mi} : 회전체 i 에 해당하는 터빈으로부터 축에 공급되는 기계적 토크로서 발전기 및 여자기에는 해당 없음[pu]

T_{ei} : 발전기의 전기적 토크로서 터빈 및 여자기는 해당 없음 [pu]

δ_i : 회전체 i 의 각변위 [elec rad]

$\Delta \omega_i$: 회전체 i 의 전기적 각속도 [pu]

D_i : 회전체 i 의 제동계수 [pu Torque/pu speed deviation]

H_i : 회전체 i 의 관성계수 [MJ/MVA]

$K_{i,(i+1)}$: 회전체 i 와 $i+1$ 을 연결하는 축의 스프링 상수 [pu Torque/elec rad]

ω_B : 전기적 동기속도

터빈모델이 포함되면, 각 터빈토크 T_{mi} 는 터빈모델에 의하여 결정되는 상태변수로 표현되고 터빈모델을 표현하는 미분방정식이 추가된다. 사례연구에서 사용할 IEEE의 benchmark 계통에서는 [7,8] 터빈모델이 포함되지 않았으므로 생략한다. 발전기 공극의 토크는

$$T_e = \lambda_d i_q - \lambda_q i_d \quad (13)$$

로 표현되므로, 이 식을 선형화 하면

$$T_e = (i_{q0} \Delta \lambda_d - i_{d0} \Delta \lambda_q) + (\lambda_{d0} \Delta i_q - \lambda_{q0} \Delta i_d) \quad (14)$$

식 (7)의 전류를 식 (14)에 대입하면, 발전기의 전기적 토크는 상태변수인 쇄교자속의 함수로 표현된다.

위에서 기술한 발전기/터빈의 선형 상태방정식을 종합하면 각 발전기에 대하여 다음 식의 형태로 표현이 가능하다.

$$F \dot{x} = A_G x + B_G z + C_G u \quad (15)$$

여기서, F 는 대각행렬이고, 상태변수벡터 x , 매개변수 벡터 z , 입력변수벡터 u 는 각각 아래와 같이 정의된다

$$x = [\lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q, \lambda_G, \lambda_Q, \omega_1 \sim \omega_5, \delta_1 \sim \delta_5]^T \quad (16)$$

$$z = [V_R, V_I]^T \quad (17)$$

$$u = [v_F, P_M \sim P_M]^T \quad (18)$$

위에서 선형방정식은 각 변수들을 한 평형점으로부터의 변화량을 사용하여 나타내므로 변화량을 나타내는 기호 Δ 를 편의상 생략하였다. 앞으로도 특별히 필요한 경우를 제외하곤 선형방정식을 나타내는데 기호 Δ 를 생략한다.

3. 네트워크 방정식

이 절에서는 과도안정도 해석을 위한 네트워크 모델을 사용하여, 각 마디에 KCL 그리고 그 마디에 연결된 모든 지로에 KVL을 적용하여 마디를 SSR 해석을 위한 네트워크 방정식 형성의 모듈 단위로 하는 체계적인 네트워크 방정식의 구성방법을 제안한다. 여기서 얻어진 네트워크 상태방정식은 스파시티 기법의 사용이 가능한 확대행렬로 표현된다.

인덕터와 캐패시터는 에너지 저장요소로서 각 요소가 미분방정식으로 표현된다. 즉, 인덕터에 흐르는 전류와 캐패시터 전압이 상태변수가 되어 상태변수 수는 인덕터와 캐패시터의 수와 동일하다. 그러나 인덕터만으로 구성된 컷셀(cutset)이 존재하는 경우 인덕터 전류는 KCL에 의해 서로 종속관계에 있으므로 그중 하나는 상태변수가 되지 못한다. 또한 캐패시터와 전압원만으로 구성된 루프가 존재하는 경우 그 루프의 캐패시터 전압은 서로 종속관계에 있으므로 그들 중 하나는 상태변수가 되지 못한다. 이러한 네트워크를 degenerate 네트워크라 하고, 앞으로 편의상 상태변수가 되지 못하는 인덕터 전류나 캐패시터 전압을 편의상 준상태변수라 부르기로 한다. 네트워크 방정식의 형성과정을 보이기 위해 간단한 單相 계통을 예로 들고 나중에 3상 계통으로 확장한다.

3.1 Degenerate Network

그림 4는 문헌 [2]에서 네트워크방정식 유도에 사용한 간단한 degenerate 네트워크이다. 마디 2에서의 컷셀이 인덕터만으로 구성되어 L_1, L_2, L_4 에 흐르는 전류중의 하나는 준상태변수가 된다. 또한 e_4, C_3, C_5 로 구성된 루프에서 한 캐패시터의 전압은 다른 캐패시터 전압과 e_4 의 선형결합으로 표현되므로 준상태변수가 된다.

매개변수로 저항/캐패시터로 이루어진 지로의 전류, 마디전압 그리고 준상태변수 i_{L4} 와 v_{C5} 를 취하고, 각 마디에 KCL 그리고 각 지로에 KVL을 적용하면 아래와 같은 상태방정식과 매개방정식을 얻을 수 있다.

상태방정식

상태변수인 인덕터를 포함하는 지로에 KVL을 적용한 전압식과 상태변수인 캐패시터의 전류식으로 구성된다.

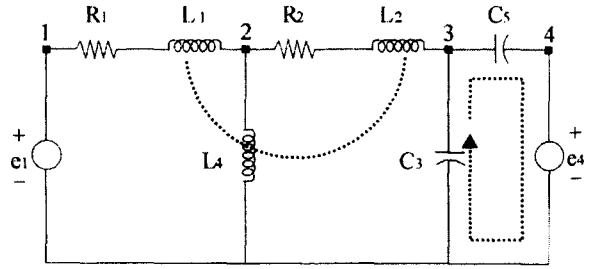


그림 4 SSR 해석을 위한 간단한 degenerate 네트워크
Fig. 4 A simple degenerate network for SSR analysis

$$L_1 p i_{L1} = -R_1 i_{L1} - v_2 + e_1 \quad (19)$$

$$L_2 p i_{L2} = -R_2 i_{L2} + v_2 - v_3 \quad (20)$$

$$C_3 p v_{C3} = i_{C3} \quad (21)$$

매개방정식

매개방정식은 저항/캐패시터로 구성된 지로나, 인덕터에 흐르는 전류가 상태변수가 되지 못하는 인덕터를 포함하는 모든 지로에 KVL (식(22)~(24)), 모든 마디에 KCL (식(25), (26)), 캐패시터 전압이 상태변수가 되지 못하는 캐패시터의 전류식 (식(27))으로 구성된다.

$$-v_2 + L_4 p i_{L4} = 0 \quad (22)$$

$$v_3 = v_{C3} \quad (23)$$

$$v_3 - v_{C5} = e_4 \quad (24)$$

$$i_{L4} = i_{L1} - i_{L2} \quad (25)$$

$$i_{C3} + i_{C5} = i_{L2} \quad (26)$$

$$-i_{C5} + C_5 p v_{C5} = 0 \quad (27)$$

식 (22)-(27)에서 매개변수는 좌변에, 상태변수와 입력은 우변에 배치하였다. Degenerate 네트워크에 대한 매개방정식에서 준상태변수를 구성하는 식 (22)와 (27)에서 준상태변수의 미분이 포함되어 있다. 따라서 이들 변수 $p i_{L4}$ 와 $p v_{C5}$ 는 매개변수로 작용하고, 이들 변수를 소거하기 위한 추가방정식이 필요하다. 이 추가방정식은 degenerate 네트워크를 형성하는 요인을 제공하는 회로법칙에서 얻을 수 있다. 인덕터 전류 i_{L4} 의 경우 마디 2에서의 KCL을 적용한 식 (25)를 미분하면

$$p i_{L4} = p i_{L1} - p i_{L2} \quad (28)$$

캐패시터전압 v_{C5} 의 경우는 캐패시터와 전압원만으로 구성되는 루프가 degenerate 네트워크를 형성하는 요인이며, 이 루프에서의 KVL을 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$v_{C5} = v_{C4} - e_4 \quad (29)$$

이 식을 미분하면

$$p v_{C5} = p v_{C4} - p e_4 \quad (30)$$

상태변수 벡터 x , 매개변수 벡터 z , 준상태변수 벡터의 미분 z_d , 입력변수 벡터 u 를 아래와 같이 정의하면,

$$x = (i_{L1}, i_{L2}, v_{C3})^T \quad (31)$$

$$z = (v_2, v_3, v_{C5}, i_{C3}, i_{L4}, i_{C5})^T \quad (32)$$

$$z_d = (p i_{L4}, p v_{C5})^T \quad (33)$$

$$u = (e_1, e_4, p e_4)^T \quad (34)$$

식 (19)-(21)의 상태방정식, 식 (22)-(27)의 매개방정식, 식(28)과 (30)의 준상태변수의 미분관계식은 행렬 형태로 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$P \dot{x} = D x + E z + B u \quad (35)$$

$$F z + G z_d = H x + J u \quad (36)$$

$$K z_d = L \dot{x} + M u \quad (37)$$

식 (36)-(37)을 연립하여 한번에 매개변수 z , z_d 의 해를 상태변수의 함수로 나타내고, 이를 식 (35)에 대입하여 상태행렬을 계산하는 것이 가능하다. 그러나, 식 (37)에서 z_d 의 해를 독립적으로 계산하고 여기서 얻어진 해를 식 (36)과 (35)에 대입하여 상태방정식을 확대행렬 형태로 표현하는 것이 대규모 계통에 적용하는데 더 편리하다. 식 (37)을 다시 쓰면

$$z_d = K^{-1} L \dot{x} + K^{-1} M u = L' \dot{x} + M' u \quad (38)$$

이 식을 식 (36)에 대입하면

$$\begin{aligned} F z &= H x - G L' \dot{x} + (J - G M') u \\ &= H x - G' \dot{x} + J' u \end{aligned} \quad (39)$$

식 (39)에서 계산한 z 를 (35)에 대입하면

$$(P + E F^{-1} G') \dot{x} = (D + E F^{-1} H) x + B' u \quad (40)$$

이 네트워크 방정식을 표준형으로 표현하면 상태행렬은

$$A = (P - E F^{-1} G')^{-1} (D + E F^{-1} H) \quad (41)$$

결론적으로 각 마디에 KCL을 그리고 그 마디에 연결된 모든 지로에 KVL을 적용하면 매우 스파스한 행렬 P, E, F, G', H' 을 체계적으로 얻는 것이 가능하고 상태행렬은 식 (41)로 계산된다.

네트워크 상태방정식을 모듈라하게 유도하기 위한 과정을 요약하면 다음과 같다.

1. 모선번호를 증가시키면서 각 모선에 KCL을, 그리고 그 모선에 연결된 모든 지로에 KVL을 적용하여 상태방정식과 매개방정식을 결정한다. 이 때 상태변수는 인덕터 전류와 캐패시터 전압, 그리고 매개변수는 모선전압과 저항과 캐피시터만으로 구성된 지로의 전류가 된다.

2. 만약 그 모선에 인덕턴스만으로 구성된 컷셀이 발견되면 한 인덕턴스의 전류는 매개변수가 되고 식 (28) 형태의 전류미분방정식이 추가된다. 또한, 그 모선 주위에 캐패시터와 전압원만으로 구성된 루프가 존재하면 이들 캐패시터 전압 중 하나는 매개변수가 되고 식 (30) 형태의 전압미분방정식이 추가된다.

3. 식 (35)-(37)의 행렬이 형성되면 식 (38)의 L' 와 M' 를 계산한다.

4. 식 (41)에 의해 상태행렬을 계산하고 고유치해석을 수행한다.

3.2 3상 네트워크로의 확대

그림 2에서 계통의 동기각속도 ω_B 로 회전하는 계통기 준축 R이 고정된 a상의 축과

$$\theta = \omega_B t + \pi/2$$

의 위상차를 가진다고 하자. 고정된 a상에 대하여 나타낸 순시전압 v_{abc} 를 페이서 (phasor) 전압으로 나타내기 위해서 Park 변환을 수행한다 [2]. 즉,

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_I \\ v_R \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (42)$$

또는

$$v_{0IR} = P v_{abc} \quad (43)$$

또한

$$\begin{aligned} P(\dot{v}_{abc}) &= \dot{v}_{0IR} - \dot{P} P^{-1} v_{0IR} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{v}_I \\ \dot{v}_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_I \\ v_R \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (44)$$

임도 보일 수 있다 [2]. SSR 해석에서는 3상이 평행된 것으로 가정하기 때문에 영상성분은 무시한다. 이 관계를 이용하여 단상계통에서 유도된 네트워크 방정식을 3상 계통으

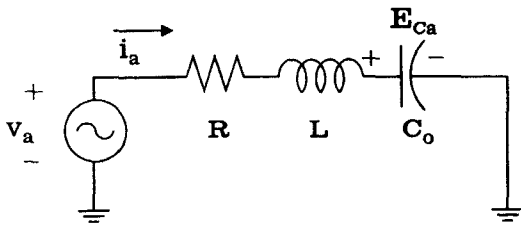


그림 5 a상의 회로도
Fig. 5 Circuit diagram for phase a

로 확장하여 구성하는 것이 가능하다. 예를 들면, 그림 5의 RLC 직렬회로에서, abc 상으로 나타낸 회로방정식은

$$e_{abc} = R i_{abc} + L \dot{i}_{abc} + v_{abc} \quad (45)$$

$$i_{abc} = C \dot{v}_{abc} \quad (46)$$

이 방정식을 RI-축으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} e_I \\ e_R \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_I \\ i_R \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} \dot{i}_I \\ \dot{i}_R \end{bmatrix} - \omega L \begin{bmatrix} -i_R \\ i_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_I \\ v_R \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} i_I \\ i_R \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \dot{v}_I \\ \dot{v}_R \end{bmatrix} - \omega C \begin{bmatrix} -v_R \\ v_I \end{bmatrix} \quad (48)$$

3.1절에서 단상 계통에 대해서 유도한 네트워크 방정식을 3상으로 확장하기 위해서는, 각 회로요소에 대해서 유도한 수식을 식 (47)-(48)처럼 RI축으로 확장하면 된다.

4. 사례 연구

IEEE SSR Working Group이 제안한 First Benchmark Model (FBM)과 [7] Second Benchmark Model (SBM), System #2에 [8] 대하여 제안된 알고리즘을 시험하였다. 선형모델은 식 (35)-(37)의 형태로 유도되고 식 (41)에 의하여 상태행렬을 계산한 후에 IMSL의 EVCGR를 [13] 사용하여 고유치와 고유벡터를 계산하였다.

4.1 First Benchmark Model

그림 6의 FBM 계통은 발전기 1기가 변압기/송전선로를 통하여 큰 계통에 연결되어 있다. 계통은 테브닌 임피던스 X_{Srs} 와 무한모션으로 등가화 되었다. 발전기는 직축에 고정자권선, 계자권선 그리고 1개의 제동권선을 가지며, 횡축엔 고정자 그리고 2개의 제동권선을 가지는 상세 모델이다. 터빈은 고압, 중압 그리고 2개의 저압터빈으로 구성되는 전형적인 대형 증기터빈이며 발전기는 회전형 여자기에 연결되고, 터빈과 여자기 모델은 생략되었다.

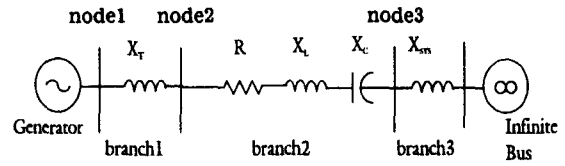


그림 6 IEEE FBM 네트워크 모델 [7]
Fig. 6 The IEEE first benchmark model network [7]

상태방정식은 20차 선형 미분방정식으로 표현되고, 그 상태변수들은 아래와 같다.

$$x = [\lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_q, \lambda_G, \lambda_Q, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_G, \omega_{EX}, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_G, \delta_{EX}, v_{CR}, v_{CI}]^T \quad (49)$$

여기서 $\lambda_d \sim \lambda_Q$ 는 동기발전기의 상태변수인 각 권선의 쇠교자속이고, v_{CR}, v_{CI} 는 RI-축으로 나타낸 직렬 캐패시터에 걸리는 전압, $\omega_1 \sim \omega_{EX}$ 는 각 회전체의 각속도, $\delta_1 \sim \delta_X$ 는 각 회전체의 각변위이다.

표 1은 modular 네트워크 모델 구성에 의한 SSR 해석 모델의 고유치를 보여주고 있다. 계통의 초기조건으로 선로의 직렬보상은 선로리액턴스의 70% 하였으며, 무한모션과 발전기 단자전압은 크기를 1 pu, 발전기 유효전력 출력은 발전기 정격 MVA의 90%인 803.16 MW, 그리고 각 회전체의 제동계수는 0으로 취하였다. 표의 우측 칼럼엔 SSR/EIGEN에서 계산된 고유치를 보여주고 있다. 문헌 [2]에서 계통의 초기조건이 명시되지 않아 본 논문의 결과와 직접적인 비교가 어려우나 저주파 진동모드인 1.774 Hz 모드를 제외하고 98.1 Hz의 supersynchronous 모드와 15.8 - 47.5 Hz 대역의 subsynchronous 모드의 진동주파수가 본

표 1 70% 직렬 보상된 FBM 계통의 고유치
Table 1 Eigenvalues of FBM with 70% compensation

No.	Computed Eigenvalue			SSR/EIGEN	
	real	imag. [rad/s]	frequency [Hz]	real	imag. [Hz]
1	-4.765	±616.621	±98.138	-6.810	±98.123
2	-0.000	±298.177	±47.456	-0.000	±47.456
3	0.002	±202.817	±32.279	0.002	±32.287
4	0.039	±160.304	±25.513	0.004	±25.527
5	-3.973	±136.836	±21.778	-5.541	±21.801
6	0.084	±127.187	±20.242	0.079	±20.237
7	0.080	±99.901	±15.899	0.078	±15.869
8	-41.171	0.		-41.296	
9	-21.206	0.		-25.412	
10	-0.308	±11.151	±1.774	-1.218	±1.686
11	-0.374	0.		-0.947	
12	-0.115	0.		-0.776	

논문의 결과와 잘 일치하고 있다. 이는 supersynchronous 또는 subsynchronous의 진동주파수는 주로 각 회전체의 관성계수와 스프링상수에 의해 결정되고, 따라서 계통의 초기조건에 덜 민감하다. 그러나 저주파진동 모드의 주파수가 일치하지 않는 것은 이 주파수가 동기화계수에 민감하게 영향을 받고, 이 동기화계수는 직렬보상을 등 계통조건에 영향을 받기 때문일 것으로 생각된다. 계통의 정도를 나타내는 진동모드의 실수부에서는, 관심의 대상인 제동특성이 나쁜 고유치에서는 거의 정확하게 일치하나 비교적 제동이 잘되는 1, 5, 그리고 9번의 고유치 실수부가 약간의 차이를 보이고 있는데 이 차이는 발전기 단자전압 등 계통의 초기조건이 SSR/EIGEN의 경우와 차이가 있기 때문으로 판단되며 계통이 잘되므로 주된 관심의 대상이 아니다. 또한 상태행렬의 조건수 (condition number)가 크기 때문에 초기조건의 차이에 의한 상태행렬의 차이가 두 결과의 차이를 확대했을 가능성도 있다.

4.2 Second Benchmark Model

FBM이 1기의 발전기가 방사상 송전계통을 통하여 무한 모선에 연결되어 단일 공진현상을 유발하는 특성을 가진데 비하여, 그림 7의 SBM #2 계통은 두 기의 발전기가 방사상 송전계통을 통하여 무한모선에 연결되어 FBM에서 관측되는 직렬공진 현상 외에 두 발전기간의 병렬공진 현상을 모의할 수 있도록 고안되었다. 계통은 테브닌 임피던스 X_{sys} 와 무한모선으로 등가화 되고, 발전기는 직축에 고정자권선, 계자권선 그리고 1개의 제동권선을 가지며 횡축엔 고정자 그리고 2개의 제동권선을 가지는 상세 모델이다. 두 발전기의 터빈 모두 고압과 1기의 저압터빈으로 구성되고, 1번 발전기는 회전형 여자기를 사용하고, 2번 발전기는 정지형 여자기를 사용한다. 발전기/터빈, 네트워크의 상세한 모델 데이터는 문헌 [8]에 수록되어 여기서는 기술하지 않는다. FBM에서처럼 터빈과 여자기의 모델은 생략되었다. 이 시스템은 28차 선형상태방정식으로 표현되고, 그 상태변수들은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 x = [& \lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_q, \lambda_G, \lambda_Q, \\
 & \omega_{M1}, \omega_{L1}, \omega_{G1}, \omega_{X1}, \delta_{M1}, \delta_{L1}, \delta_{G1}, \delta_{X1}, \\
 & \lambda_d, \lambda_F, \lambda_D, \lambda_q, \lambda_G, \lambda_Q, \\
 & \omega_{M2}, \omega_{L2}, \omega_{G2}, \delta_{M2}, \delta_{L2}, \delta_{G2}, v_{CR}, v_{CI}]^T
 \end{aligned}
 \tag{50}$$

위에서 기호는 FBM의 경우와 동일하며, 아래첨자에 추가된 숫자는 발전기 번호를 나타낸다.

표 2는 2절에서 제안된 방법에 의하여 계산된 고유치 중에서 SSR 모드만을 보여주고 있다. 계통의 초기조건으로 선로의 직렬보상은 선로리액턴스의 65%로 하였으며, 무한 모선과 발전기 단자전압은 크기를 1 pu, 발전기 유효전력 출력은 발전기 정격 MVA의 90%, 그리고 각 회전체의 제동계수는 0으로 취하였다. 문헌 [2]에서 계통의 초기조건이 명시되지 않아 본 논문의 결과와 우측 칼럼에 표시된 SSR/EIGEN의 결과를 직접적으로 비교하는 것이 어려우나

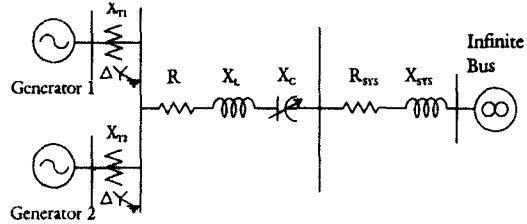


그림 7 IEEE SBM 네트워크 모델 [8]
 Fig. 7 The IEEE Second Benchmark Model Network [8]

FBM에서의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 즉, supersynchronous와 subsynchronous 모드의 진동주파수가 본 논문의 결과와 정확히 일치하고, 진동모드의 실수부에 대해서는 제동특성이 나쁜 고유치에서는 양호하게 일치하나 비교적 제동이 잘되는 고유치의 실수부가 약간의 차이를 보이고 있다. 이 차이는 FBM에서처럼 SSR/EIGEN과 초기조건이 다르기 때문으로 판단된다.

표 2 65% 보상할 경우 SBM 계통의 고유값
 Table 2 Eigenvalues of SBM with 65% compensation

mode No.	Computed Eigenvalues			SSR/EIGEN	
	real	imag. [rad/s]	frequency [Hz]	real	frequency [Hz]
1	-19.214	±586.15	±93.289	-12.086	±93.315
2	-9.8913	±377.02	±60.005	-6.3168	±60.013
3	-0.05014	±320.69	±51.039	-0.0050	±51.110
4	-0.00986	±282.41	±44.947	-0.0100	±45.007
5	-0.03756	±203.17	±32.336	-0.1809	±32.383
6	-14.073	±167.08	±26.592	-11.3481	±26.593
7	-0.01813	±156.05	±24.836	0.0929	±24.771
8	0.59810	±155.69	±24.779	0.3101	±24.773

5. 결론

본 논문에서는 SSR현상의 고유치해석을 위해, 계통의 안정도해석을 위한 기기와 네트워크 데이터에 발전기/터빈 측 시스템 데이터만을 추가하여 modular하게 네트워크 방정식을 유도하고 고유치해석을 수행하는 알고리즘을 개발한 결과를 기술하였다.

네트워크 방정식은 각 모선에 KCL을 그리고 이 모선에 연결된 지로에 KVL을 적용하여 모선을 네트워크 방정식을 구성하는 모듈단위로 하여 체계적으로 얻어지고, 상태방정식과 매개방정식으로 구성되는 확대행렬의 형태로 표현되었다. 이와 같이 확대 상태방정식 형태로 유도된 발전기/터빈과 네트워크 모델은 매우 스파스한 형태를 취하여 대규모 계통에도 적용이 가능하며, 기존의 SSR/EIGEN이 일반적인 회로를 해석하도록 고안된 프로그램을 사용하여 필요 이상으로 복잡하고 스파시티 기법의 사용이 어려워 대규모계통에 적용이 불가능하고 감도해석 등 좀더 발전적인 프로그램의 개발이 제약을 받는데 비하여 진보된 것으로 생각된다

다. 제안된 알고리즘을 IEEE의 FBM과 SBM에 적용한 결과와 SSR 현상의 고유치해석 프로그램인 SSR/EIGEN의 결과와 비교한 결과 진동주파수와 제동특성의 추이는 거의 일치하였으나 고유치의 실수부에서는 약간의 차이를 보였다. 이 차이는 SSR/EIGEN에서 직렬보상 비율, 회전체의 제동계수, 그리고 발전기출력 등 계통의 초기조건이 정확하게 명시되지 않아 이를 정확히 반영하지 못한 때문인 것으로 생각된다.

본 논문에서는 직렬 보상된 네트워크의 상태방정식을 modular하게 구성하는 방법에 중점을 두어, 앞으로 광범위하게 응용될 것으로 예상되는 FACTS 기기를 고려하지 않았다. 제안된 알고리즘을 좀더 일반화하기 위해 FACTS 기기의 모델과 이들을 포함한 Benchmark 모델의 개발에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 한국한술진흥재단의 자유공과과제 97-001-E00192 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994, pp. 1050-1071.
 [2] P.M. Anderson, B.L. Agrawal, J.E. Van Ness, Subsynchronous Resonance in Power Systems, IEEE Press, 1990, pp. 3-27.
 [3] IEEE Committee Report, "Reader's Guide to Subsynchronous Resonance," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 150-157, February 1992
 [4] IEEE Committee Report, "Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, pp. 1326-1334, June 1985.
 [5] IEEE Committee Report, "Second supplement to a Bibliography for Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp. 321-327, February 1985.
 [6] IEEE Committee Report, "Third supplement to a Bibliography for Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems," paper no. 90 SM 328-5-PWRS presented at the PES Summer Meeting, Minneapolis, Minnesota, July 1990.
 [7] IEEE Committee Report, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance," IEEE Trans., PAS-96, No. 5, Sept./Oct. 1977.
 [8] IEEE Committee Report, "Second Benchmark Model for Computer Simulation for Subsynchronous

Resonance", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 5, 1985, pp.1057-1066.
 [9] P.M. Anderson, B.L. Agrawal, J.E. Van Ness, "Eigenvalue Analysis for SSR," IEEE Special Publication 90 TH0292-3-PWR, Eigenvalue and Frequency Domain Methods for Systems Dynamic Performance, 1990.
 [10] IEEE Power Engineering Society, "FACTS Overview," IEEE/PES 1995 Summer Meeting, July 1995.
 [11] 남해곤, 심관식, 김용구, 이광연, "A New Eigen-Sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis," IEEE Transaction on Power System에 게재확정, Paper # PE-464-PWRS-0-02-1999
 [12] 남해곤, 심관식, 문채주, "Modal Analysis of Large Scale Power System Using Hessenberg Process," 대한전기학회 논문지, 42권, 10호, pp 53-63, 1993. 10.
 [13] IMSL, User's Manual, Math/Library, Vol. 1, April 1987.

저 자 소 개

남 해 곤 (南 海 鯨)

전기학회 논문지 제 48권 제 8호 참조

Tel : (062) 530-1745

E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr

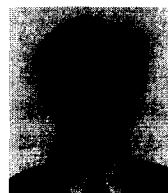


김 용 구 (金 容 求)

1969년 12월 29일생. 1995년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정 수료.

Tel : (062) 530-0745

E-mail:u9798005@chonnam.chonnam.ac.kr



심 관 식 (沈 冠 植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 졸업(석사). 1997년 동대학원 졸업(공학박사). 1997년~현재 서남대학교 전자전기공학과 전임강사.

Tel : (0671) 620-0298

E-mail : simgong@tiger.seonam.ac.kr