



실시간 전력계통의 안정도 해석과 평가 기술

■ 남 해 곤, 심 관 식 / 전남대학교 대용량 분산전원연계기술 연구센터
 ■ 이 병 준, 한 상 욱 / 고려대학교 대정전예방기술연구센터

1. 서 론

최근 세계 각국에서 경험하고 있는 대규모 계통 고장은 산업의 성장에 따른 전력수요의 증가와 다양한 기기들의 설비에 따른 계통 운용 환경의 복잡성에 기인하고 있다. 특히 원유를 비롯한 원자재 가격의 급상승으로 전력분야에서도 경제적인 계통운용 문제가 더욱더 중요한 이슈가 될 것으로 예상된다. 이러한 계통 운영 환경에서 계통은 다양한 안정도 문제를 내포하고 있다. 특히 한계치에 근접하여 운전하고 있는 상황에서 외란은 계통에 잠재되어 있는 저주파진동의 동요를 공진시키거나 전압 불안정 문제를 야기할 수 있고, 적절한 제어동작이 수반되지 않으면 계통분리나 전압붕괴를 일으킬 수 있는 위험이 있다. 따라서 해석적인 측면보다 운용적인 측면에서 정확하고 신속한 운전 결정을 내릴 수 있는 실시간 계통 운용 정보가 필요하다.

이와 같은 목적으로 세계 각국은 계통의 안정적 운용을 위한 하나의 수단으로 전력기술과 디지털통신기술을 접목한 WAMS(wide area monitoring system)을 활발하게 개발하고 있으며, 더 나아가서 WAMS를 확장한 WAMPAC(wide area monitoring protection, and control)[2]을 경쟁적으로 연구 개발하고 있다. WAMS는 GPS에 의해서 시각동기화 된 데이터를 취득하여 광역계통을 모니터링 하는 시스템으로 계통 운용 및 계획, 유지보수 등에 필요한 정보를 얻을 수 있다. 광역

계통 운용에서 계통의 안정성이 주요 관심일 때, 지역 전압 프로파일이나 선로 조류, 발전단의 출력들을 시각동기화 된 상태에서 모니터링 할 수 있다. 또한 WAMS는 광역 계통의 모니터링에 국한하지 않고, 광역의 전압불안정 현상과 저주파진동 해석에 적용할 수 있다[2-5].

표 1에는 세계 각국의 WAMS 개발 동향을 나타내고 있다[6]. 지금까지 주로 전압안정도 및 위상각안정도 해석, 발전정지 검출, 저주파 진동문제와 오프라인에서 고장해석 및 동적모델 검증, EMS와 연계한 정밀상태추정 등 계통의 안정운용과 관련된 다양한 분야에 적용하고 있다.

계통에 선로사고와 같은 외란이 발생하게 되면 주위 선로의 조류량이 급격히 증가하면서 이에 따라 무효전력 손실이 크게 늘어나게 되는데, 이는 전압 강하를 일으키고, 이에 따라 ULTC 등 조상설비가 동작 하여 무효전력 부족현상을 더욱 심화시켜 전압 붕괴 및 발전기의 동기 탈조 등의 현상으로 이어져 대규모 정전이 발생하게 된다. 또한 전력계통에서 외란에 따른 국부적인 불안정 현상으로 저주파진동이 지속되면서 일부 발전기가 동기 탈조되거나 계통이 지역 간에 동기화를 상실하면, 계통이 분리되고 광역정전을 유발할 수 있다. 이들은 최근에 세계 각국에서 자주 발생하고 있는 광역정전의 한 원인이 될 수 있다. 우리나라 계통에서도 현재 전압문제가 계통 운용에 있어서 가장 심각한

요소로 작용하고 있고, 지역간 저주파진동 문제도 잠재하고 있다.

실시간으로 계통의 전압안정도를 감시하기 위해서는 PMU(Phasor Measurement Unit)나 iPIU(intelligent Phasor Information Unit)를 계통의 주요 위치에 설치하고, 전압 및 전류 정보를 취득하여 전압안정도 지수를 계산해야 한다. 광역의 계통을 감시하기 위해서는

계통의 주요 위치에 iPIU가 설치되어야 하며, 이를 통하여 실시간광역계통감시지수(WAVI, Wide Area Voltage stability Index)를 계산하게 된다. WAVI는 0에서 1사이의 실수 값으로써, 1에 가까워질수록 계통이 불안정한 상태임을 나타낸다.

계통에서 취득한 시각동기화 된 데이터에서 저주파진동을 해석하기 위해서는 지배적인 저주파 진동 파라미

표 1 세계 각국의 WAMS 응용기술 현황

Applications	ETRANS (Switzerland)	HEP (Croatia)	Hydro Quebec (Canada)	WSCC (USA)	EIPP (USA)	TERNA (Italy)	West Japan (Japan)	University Proj. (Sweden)	Elkraft (Denmark)	APG (Austria)	EGAT (Thailand)	Various Projects (China)	NEMMCO (Australia)	Hungary
Phase angle difference/ angle stability	X	X	X	X	X	P		X	X	X	X	X		
Steady state line/corridor loading	X	X		X		P			X	X		X		
Voltage stability		X		X		P						P		
Line thermal loading	X					P				X				
Frequency, power plant outage detection	P			X	X	P		X		X	X	P		
Islanding detection	P					P						P		
Oscillation/ damping identification	X		P	X		X	X		X		X	X	X	
Damping Control			P	P										
Power Flow Control										P				
State Estimation			P		P							P		
Offline disturbance analysis	X		X	X	X	P			X	X	X	X	X	X
Offline dynamic model adaptation	X		X	X		P					X	P	X	X
Commercial Operation	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X
University/ Research Installation							X	X	X					

* P = in planning stage, X = in operation

터를 추정해야 하고, 추정한 파라미터들에서 계통해석 및 운용에 필요한 진동모드를 선별해야 한다. 그러므로 계통의 저주파진동해석에 적당한 진동모드 선택기준과 적절한 데이터 샘플링 및 실시간 해석에 적당한 시간 구간의 설정이 필요하다. 또한 시각동기화 된 지역 신호에서 추정한 파라미터들로부터 광역모드를 해석할 수 있는 지역간 모드들의 동조 상태를 파악해야 한다.

본 원고는 WAMS와 유사한 지능형 전력인프라 defense 시스템인 K-WAMS에서 실시간으로 계통의 안정성을 평가하는 기술에 관한 것이다. 광역의 전압불안정 문제와 저주파 진동문제를 실시간으로 감시할 수 있는 K-WAMS의 개발이 완료되면 계통운용에 있어서 유용한 도구가 될 것이다.

2. 실시간 전압안정도 해석 기술

2.1. 지역전압안정도 감시 지수 LAVI(Local Area Voltage stability Index)

LAVI는 모선에서 측정되는 전압과 전류로부터 계통의 전압안정도 여유를 계산하여 필요시 부하차단을 시행할 수 있는 알고리즘이다. LAVI는 기존의 전압안정도 감시 알고리즘과 달리 계통 정보 없이 설치 지역에서 측정된 정보만으로 전압안정도 여유를 계산할 수 있어, 전

압안정도 감시와 필요시 부하차단을 스스로 시행할 수 있는 고도로 지능화 된 알고리즘이다. K-WAMS에서 개발된 LAVI의 기본적인 알고리즘은 그림 1과 같다.

LAVI의 Z지수는 기존의 저전압 계전기와 연계되어, 급격한 사고 발생 시 계통 보호 차원에서 부하를 계통으로부터 분리시키도록 저전압 계전기에 신호를 주는 온라인 감시 지수로 주로 사용된다. 온라인 감시를 위한 Z지수의 원리를 살펴보면, 계통의 변화에 따라 부하의 임피던스가 테브닌 임피던스에 가까워진다는 사실에 착안하여, 시간에 따른 부하의 임피던스 궤적을 통해 전압안정도 측면에서 사고의 심각성을 판별하게 된다.

계통의 전압안정성을 감시하려면 우선 실시간으로 변화하는 테브닌 임피던스를 먼저 알아야 한다. 그림 1의 테브닌 등가회로에서 회로방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$\bar{E}_{Th} = \bar{V} + \bar{Z}_{Th} \bar{I} \quad (1)$$

이 식의 변수들을 $\bar{E}_{Th} = E_r + jE_i$, $\bar{Z}_{Th} = R_{Th} + jX_{Th}$, $\bar{V} = c + jd$, $\bar{I} = a + jb$ 로 놓으면 식 (1)은 식 (2)로 변형된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -a & b \\ 0 & 1 & -b & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Th} \\ X_{Th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 살펴보면 a, b, c, d 값을 알고 있다 하더라도 식의 수가 모자라서 단독으로는 4개의 변수에 대해 풀 수 없다. 그러나 회로이론 법칙이 임의의 운전점 또는 시간에서 성립되어야 한다는 사실을 이용하면 시간에 따라 변화하는 계통에 대하여 두 개 이상의 식을 중첩하여 해를 구할 수 있게 된다. 데이터 창 크기를 조정하여 두 개 이상의 식을 중첩하여 선형 최소제곱법을 이용하면 식(2)의 해를 구할 수 있다. 이러한 과정을 통해 계통의 테브닌 임피던스를 구할 수 있다.

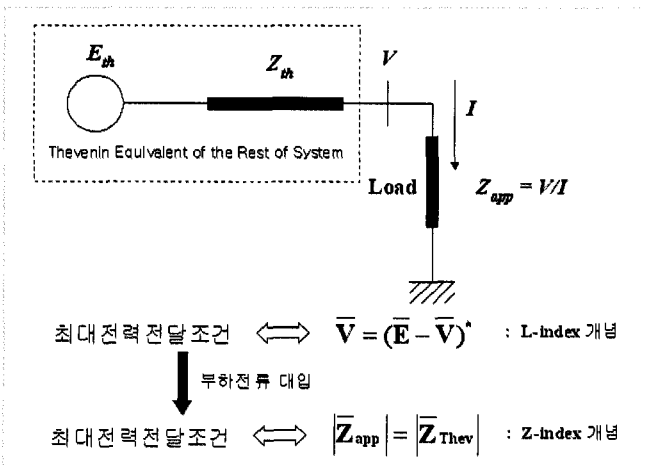


그림 1 LAVI 알고리즘 기본 원리

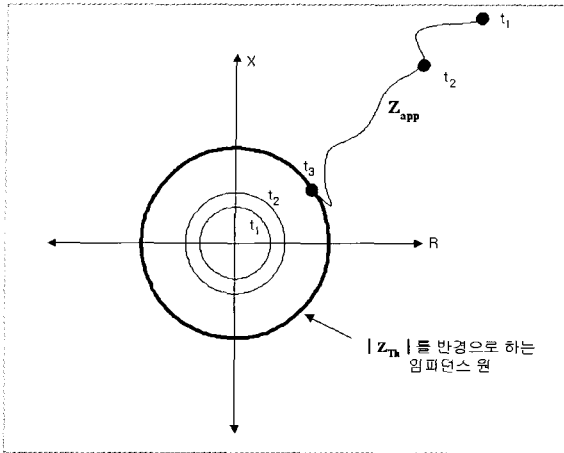


그림 2 임피던스 평면에서 테브난 임피던스 원과 계통의 상태변화에 따른 부하 임피던스의 궤적

위와 같이 등가 전원이 부하에 전달할 수 있는 최대 전력은 테브난 임피던스와 부하 임피던스가 같아질 때이다. 이 법칙을 전력계통에 적용해 보면 계통이 부하 모선에 공급할 수 있는 전력의 한계값은 $|\bar{Z}_{app}| = |\bar{Z}_{th}|$ 라는 조건이 성립할 때의 부하전력이다. 이 이론은 부하특성에 관계없이 성립하므로 임피던스 평면상에서 정적인 전압불안정 현상을 설명할 수 있다. 부하증가나 계통고장과 같은 계통상태의 변화에 대한 안정도 추이를 임피던스 평면 위에서 살펴보면 그림 2와 같다. 임피던스 평면상에서 테브난 임피던스는 원으로 표현되고 계통상태가 변화하면 원의 크기와 부하 임피던스 \bar{Z}_{app} 의 궤적이 변화한다. 부하가 증가하거나 외란이 발생하여 계통상태가 불안정한 방향으로 이동하면 \bar{Z}_{app} 의 궤적은 테브난 임피던스 원에 가까워지고 동시에 테브난 임피던스의 원의 크기는 증가한다. 계통이 불안정해지면 \bar{Z}_{app} 의 궤적은 원의 표면에 도달하여 원의 내부로 진입하는 순간 정적인 전압불안정 현상이 발생한다. 그림 2에서 t1일 때에는 테브난 임피던스 원과 부하임피던스 사이에 상당한 거리를 유지하고 있다가 시간이 지나 t2일 때 부하증가나 계통고장과 같은 외란이 발생하여 테브난 임피던스의 원의 반지름이 증가하고 부하 임피던스의 궤적이 원의 방향으로 이동한다. 만일 계통에 더 심각한 외란이 발생하여 전압안정도

한계점에 도달한다면 t3인 순간에 테브난 임피던스의 크기는 급격하게 증가하고 부하임피던스의 크기는 작아져서 그림과 같이 부하임피던스의 궤적이 테브난 임피던스 원의 내부로 진입하게 된다. 따라서 어떤 지역에서 $|\bar{Z}_{app}|$ 와 $|\bar{Z}_{th}|$ 값을 추적하는 것은 임피던스 평면 위에서 두 값의 거리를 실시간으로 추적하고 있는 것이 되고 계통의 전압안정성을 감시하는 지수로서 활용할 수 있게 된다. 계통의 전압안정도는 실시간으로 추적되는 $|\bar{Z}_{app}|$ 와 $|\bar{Z}_{th}|$ 의 비인 Z-index로써 판별되고, 안정조건을 수학적으로 표현하면 아래와 같은 조건이 된다.

$$\text{전압안정도 측면에서 안정할 조건: } \frac{|Z_{th}|}{|Z_{app}|} < 1$$

2.2. 광역전압안정도 감시 지수 WAVI (Wide Area Voltage stability Index)

LAVI 알고리즘은 최소자승법을 이용하여 계통의 테브난 임피던스를 계산해서 전압안정도를 판단한다. 이때 한정된 지역의 계통 정보만을 이용하기 때문에 정확성 향상을 위해서 2스텝 이상의 측정 데이터를 이용하여 데이터 창을 구성하고 사용되는 각 스텝의 측정 데이터는 부하의 변화에 대하여 충분히 다른 값을 가져야 하며, 구성된 등가 계통은 최소 자승법 연산 과정에서 변화하지 않고 일정하여야 한다. 따라서 LAVI 알고리즘은 변화하는 계통 환경에 의해 오차가 발생하게 되며 정확성 향상을 위한 데이터 창 구성 시간으로 인해 일반적으로 SCADA와 같은 수분대의 시간지연이 발생하게 된다.

위와 같은 단점을 극복하는 방안으로 제시한 것이 바로 WAVI 알고리즘이다. WAVI 알고리즘의 기본개념은 LAVI 알고리즘과 같이 테브난 임피던스와 부하 임피던스가 같을 때, 등가 전원이 부하에 최대 전력을 전달할 수 있다는 최대전력전달법칙을 사용한다. 다만 WAVI의 경우 최소자승법의 연산 없이 서로 다른 2곳 이상에서 측정된 계통 정보를 통해 등가 계통을 구성하여 테브난 임피던스를 구하는 것이 LAVI 알고리즘

과 다른 점이다.

WAVI 알고리즘의 진행은 다음과 같다. 먼저 감시하고자 하는 선로를 선정하고, 다음으로 iPIU 등을 이용하여 선정된 선로 양단의 모선에서 계통의 정보를 측정하여 그림 3과 같이 T-등가회로를 구성한다. 등가회로의 각 파라미터들은 측정된 계통정보와 전류방정식을 이용하여 쉽게 계산이 가능하며, 모든 파라미터의 계산이 끝나면 옴의 법칙을 이용하여 테브닌 등가회로를 구성할 수 있다. 이렇게 구성된 등가회로의 테브닌 저항을 이용하여 LAVI 알고리즘에서 제시한 방법과 같이 $|\bar{Z}_{app}|$ 와 $|\bar{Z}_m|$ 두 값의 거리를 실시간으로 추적하여 계통의 전압안정성 감시 지수로 활용할 수 있는 Z-index를 제공한다.

WAVI 알고리즘은 가상모선과 가상 선로의 개념을 이용하면 감시 범위를 확장하여 광역계통 감시에 적용이 가능하다. 그림 3의 위 그림 같이 독특한 전압 안정도 특성을 가진 전압 제어지역으로 미리 구분되어진 계통이 있다. 각 제어지역에서 전력 조류가 흘러 나가고 들어오는 각 모선과 선로를 통해 가상 모선과 가상 선로를 구성할 수 있으며 이것을 통해 그림 3의 아래 그림과 같은 등가회로를 구성하여 WAVI 알고리즘을 적용하면 광역 계통의 전압안정성을 실시간으로 감시할 수 있다. 여기서 파라미터 \bar{Z}_r , \bar{Z}_i , \bar{Z}_s 는 옴(Ohm's Laws)의 법칙과 키르히호프의 전류 법칙(Kirchhoff's

laws) 그리고 계통에서 측정된 페이지 정보인 \bar{v} , \bar{i} 과 \bar{v}_s , \bar{i}_s 를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{Z}_i = \frac{\bar{v}_2}{\bar{i}_2} \quad (3)$$

$$\bar{Z}_r = \frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{\bar{i}_2} \quad (4)$$

$$\bar{Z}_s = \frac{\bar{v}_1}{\bar{i}_1 - \bar{i}_2} \quad (5)$$

\bar{Z}_r 와 \bar{E}_g 의 값을 계산 하는 방법은 VIP++알고리즘과 가장 큰 차이라고 할 수 있다. VIP++에서는 지역 계통의 측정정보만으로 \bar{Z}_r 와 \bar{E}_g 의 값을 판단할 수 없기 때문에 전체계통의 정보를 알아야만 연산이 가능하다. 계통 정보를 이용하여 직접 임피던스를 계산할 경우 간단한 계통이나 발전단의 구성이 발전원에 가까운 경우에는 계산이 쉬우나, 계통이 복잡해지고 발전단의 구분이 발전원에서 멀어질 경우 계산이 어렵게 된다. 더구나 VIP++알고리즘을 통해 실시간 계통 감시가 이루어지고 있는 중에 축약된 발전단에서 외란이나 고장과 같은 계통의 구성 변경이 이루어지게 된다면 사전에 계산된 \bar{Z}_g 와 \bar{E}_g 의 값도 함께 변경되어 VIP++ 알고리즘을 통하여 계산되는 Z-index의 결과에 오차가 발생하게 된다[8].

본 알고리즘에서는 위와 같은 단점을 극복하기 위하

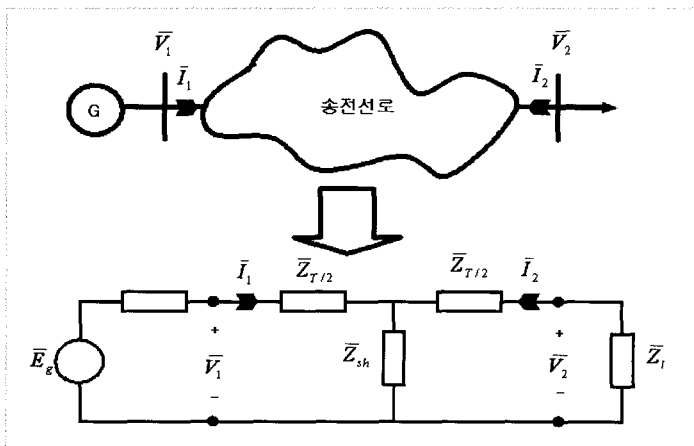


그림 3 감시모선 양단에서 측정된 정보를 이용한 T-등가회로의 구성

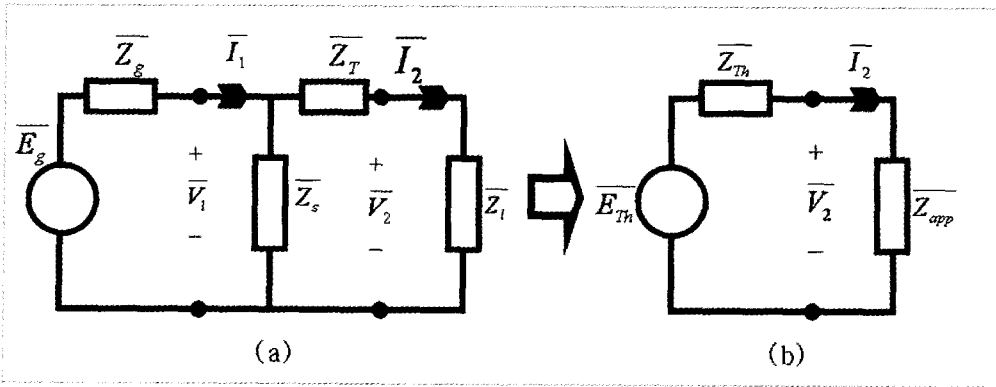


그림 4 등가회로(a)와 축약된 테브닌 등가회로(b)

여 1번 모선에서의 취득 정보로 LAVI 연산을 시행한다. LAVI의 계산결과인 \bar{Z}_m 과 \bar{E}_m 는 본 알고리즘에서 각각 \bar{Z}_g 와 \bar{E}_g 로 사용되게 된다. 위 등가회로를 테브닌 등가회로로 구성하면 그림 4와 같다.

\bar{Z}_m 과 \bar{E}_m 는 다음 식들을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\bar{Z}_{th} = \bar{Z}_T + \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_g} + \frac{1}{\bar{Z}_s}} \quad (6)$$

$$\bar{Z}_{app} = \bar{Z}_L \quad (7)$$

$$\bar{E}_{th} = \bar{V}_2 \frac{\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_{app}}{\bar{Z}_{app}} \quad (8)$$

그림 4(b)에서 보인 테브닌 등가 회로를 기본으로 하여 안정도 해석이 이루어진다. 계통의 부하 \bar{Z}_L (또는 \bar{Z}_{app})로 전달되는 복소전력 \bar{S}_L 은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{S}_L = \bar{Z}_L \left| \frac{\bar{E}_{th}}{\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_L} \right|^2 \quad (9)$$

\bar{Z}_L 이 일정한 역률을 갖는다고 가정하면 $\bar{Z}_L = k\bar{Z}_{I0}$ 로 표현이 가능하며 여기서 k는 부하의 초기 값 \bar{Z}_{I0} 에서 변화하는 부하의 변화율을 나타내며, \bar{Z}_{I0} 는 식 (3)을 통해 계산된다. 식(9)에 부하의 변화율을 적용하고 유효전력의 전달관계를 확인하면 식 (10)과 같다.

$$P_L = R[\bar{S}_L] = R \left[k\bar{Z}_{I0} \left| \frac{\bar{E}_{th}}{\bar{Z}_{th} + k\bar{Z}_{I0}} \right|^2 \right] \quad (10)$$

우리는 이미 회로법칙을 통하여 최대 전력을 전달하는 임피던스의 조건이 식 (11)과 같음을 알고 있다.

$$k_{crit} = \left| \frac{\bar{Z}_{th}}{\bar{Z}_{I0}} \right| \quad (11)$$

$k = k_{crit}$ 라 하면 식 (11)은 다음과 같이 표현가능하다.

$$P_{Lmax} = R \left[k_{crit}\bar{Z}_{I0} \left| \frac{\bar{E}_{th}}{\bar{Z}_{th} + (k_{crit}\bar{Z}_{I0})} \right|^2 \right] \quad (12)$$

따라서 $k = k_{crit}$ 일 때와 식(12)에서와 같은 최대전력전달이 가능해진다. 따라서 우리는 축약된 계통으로부터

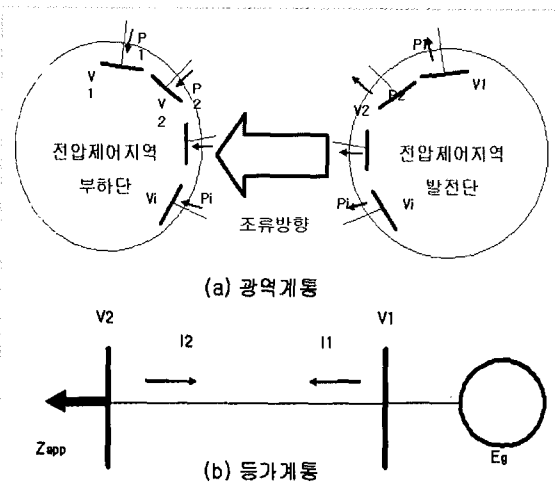


그림 4 등가회로(a)와 축약된 테브닌 등가회로(b)

터 연산되는 \bar{Z}_m 와 \bar{Z}_{app} 를 통해 전압안정도를 감시할 수 있으며 이를 Z-index라고 한다.

$$Z_{index} = \left| \frac{\bar{Z}_{th}}{\bar{Z}_{I0}} \right| \begin{cases} \geq 1 : unstable \\ < 1 : stable \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)에서 보인 것과 같이 Z-index의 값이 1보다 작으면 안정한 상태이며 1과 크거나 같으면 계통은 불안정한 상태가 된다.

3. 실시간 저주파진동 해석 기술

3.1. 저주파 진동모드 추정 방법

최근 디지털기술과 통신네트워크 기술이 빠르게 발전하면서 이산신호 처리 기술도 빠르게 발달하고 있다. 전력계통에서도 이산데이터에서 계통계획 및 운용에 필요한 정보를 얻기 위하여 많은 연구들이 진행되고 있고, 특히 계통에서 취득한 이산데이터에서 직접 계통의 진동모드를 추정하고, 이를 계통의 안전성 확보에 이용하려는 많은 연구들이 진행되고 있다. 계통의 저주파진동 해석에 적용된 대표적인 알고리즘들은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 하나는 Prony 법이고 다른 하나는 이산푸리에변환에 의한 진동모드 추정기법이다. 그러나 지금까지 전력계통의 진동모드해석에서 FFT의 장점을 이용할 수 있는 DFT(discrete Fourier transform)법 보다 Prony 법이 우수한 것으로 평가되고 있고, 이를 계통해석에 적용한 다양한 사례들이 보고되어 있다.

통계신호처리에서 이산신호에 포함된 파라미터를 추정하는 방법 중에 하나인 Prony 법은 등간격으로 샘플링 된 신호를 복소 모드의 선형결합으로 적합 하는 방법으로 계통의 시험 데이터나 외란 후 측정된 데이터에서 신호에 포함된 파라미터를 추정한다. 만일 계통에서 측정되거나 계산된 시간영역데이터가 감쇠지수 함수와 정현파 신호의 곱으로 이루어진 지수감쇠 정현파 함수라 가정하자. 이산데이터를 등간격주기로 샘플링 하고, 복소모드와 residue를 각각 Z 와 B_i 라 하면, 이산신호는 다음과 같은 이산치 형태로 표현할 수 있다.

$$x(kT) = \sum_{i=1}^m B_i z_i^k \quad (14)$$

이 식에서 복소모드와 residue를 계산할 수 있는 Prony 법은 선형예측방정식($A^T h=0$)에서 미지수를 계산하고, 이 미지수를 계수로 하는 선형예측다항식(linear prediction polynomial) $A(z)$ 로부터 이산신호의 극점을 계산한다.

$$A(z) = \sum_{i=0}^b a_i z^{-i} = 0 \quad (15)$$

선형예측다항식의 근은 복소 평면에서 극점이므로 이 극점들을 시간영역에서 필요로 하는 복소모드로 변환하면 이산 신호에 포함된 주파수와 제동계수를 결정할 수 있다. 신호의 나머지 파라미터인 모드의 residue와 위상은 각 요소가 복소극점으로 구성된 Vandermonde 행렬로 나타낸 모드방정식 $y=VB$ 에서 결정할 수 있다.

Prony 법은 데이터에 잡음이 없을 때는 정확하게 모드를 추정하나 잡음이 존재할 때는 부정확한 선형예측다항식의 계수들로 인해서 복소 극점의 위치가 매우 민감하게 변화한다. 실측데이터에서는 백색잡음을 비롯하여 다양한 잡음을 포함하고 있기 때문에 잡음의 영향을 고려해야한다. 이러한 잡음의 영향은 선형예측행렬의 차수를 로 선택함으로써 제거할 수 있는데, 이 경우는 미지수 보다 방정식이 많은 시스템이 되므로 선형예측다항식의 해를 구하기 위해서는 최소자승해법을 필요로 한다. 이와 같이 미지수보다 방정식이 많은 선형예측행렬을 이용해서 신호의 파라미터를 추정하는 방법을 확장 Prony 법이라 한다[10].

3.2. 지배적 진동모드 선택기준

계통에서 임의의 출력은 전체 계통에 존재하는 모드들의 조합으로 구성된다. 지역모드를 포함한 계통의 지배적 모드는 다른 발전기의 출력에 참여하고 있으나 한 발전기에서 중요 모드가 아니면 신호의 residue가 작은 값을 가지게 된다. 이것은 계통에서 중요 지배적 진동모드라 할지라도 특정 발전기의 출력에 대한 파라

미터 추정에서 residue가 작으면 그 시스템에 주는 영향이 작아 추정된 파라미터에서 제외할 수 있음을 의미한다. 이로부터 시간영역함수에 포함된 상대적인 residue 비교를 통해서 중요 모드뿐만 아니라 동일한 지역 내 지역간 모드의 중요도를 산정할 수 있다.

지역모드는 한 지역의 발전기가 자체적으로 동요하는 것이다. 이것은 주로 발전기 제어시스템의 영향으로 발생한다. 선형해석에서 지역모드에 대한 우고유벡터에서 그 지역모드에 대응하는 고유벡터가 매우 큰 값을 가지고 있어 지배적인 진동모드에 대응하는 발전기를 선택할 수 있다. 반면에 지역간 모드는 한 지역의 발전기가 다른 지역의 발전기와 일정한 위상차를 가지고 동요하는 것이다. 이것은 주로 발전기 제어시스템의 영향보다는 전력조류의 불일치로 발생한다. 선형해석에서 지역간 모드에 대한 고유벡터에서 지역간 모드에 참여하는 발전기들의 고유벡터 크기가 비슷한 값을 가지고 있고 위상차로 동요하고 있다. 그리고 속도참여율에서 지역간 모드에 크게 영향을 주는 발전기들을 선택할 수 있다. Prony 법에서도 모드의 residue로부터 고유벡터와 비슷하게 지역간 모드를 구분할 수 있다. 그러나 출력신호의 residue에는 계통상태의 초기조건이 포함되어 있으므로 선형해석에서 우고유벡터에 의한 지역간 모드와 차이가 있다. 즉, 입력신호(외란)에 따라서 다른 결과를 산출하므로 우고유벡터와 다르다. 우고유벡터는 선형화한 동작점에서 각 상태벡터들의 특성을 나타내는데, 신호의 residue는 비선형모델의 입력에 대한 출력의 상태를 나타낸다. 우고유벡터가 동작점에 한정되어 정상상태의 특성을 나타내는데 비하여 신호의 residue는 시간에 종속되지 않고 입력에 대해서 출력신호의 특성을 나타낸다. 그러나 지배적 모드의 residue에 의해서 지역간 모드를 구분할 때, 그 특성이 시간에 종속되지 않기 때문에 각 신호에서 기준 시간은 동일하게 적용(시각동기화)해야 한다. 계통의 모든 출력은 어떤 형태와 경로를 따라서 다른 출력과 결합되어 있다. 전술한 바와 같이 지역모드는 다른 진동모드에 나타나지만 residue의 크기가 작고 비슷한 위상차를 가지며, 지역간 모드는 진동을 참여계통에서

분배해서 가지고 있기 때문에 비슷한 크기와 위상차를 가지고 있다.

실제적인 고려사항으로 신호에서 파라미터를 추정하였을 때, ghost mode를 포함하여 많은 진동모드들을 추정한다. 이들 중에서 계통에 영향을 주는 저주파 진동 모드들을 선별해야 한다. 따라서 신호에 포함된 많은 모드들 중에서 계통의 저주파진동 해석에 적당한 지배적 모드들을 선택할 수 있는 기준이 필요하다. 먼저 고유치를 $\lambda = \alpha + j\beta$ 라 할 때, 제동비와 시정수는 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \times 100, \quad \tau = \frac{1}{|\alpha|} \quad (16)$$

그리고 상대적 residue는 진동모드들의 residue의 합으로 각 모드에 대응하는 residue를 나눈 값으로 다음과 같이 정의한다. 진동모드가 n 개 선택되었다고 할 때, 상대적 residue는 다음과 같이 정의한다.

$$\%A = \frac{A_i}{A_\Sigma} \times 100, \quad A_\Sigma = \sum_{i=1}^n A_i \quad (17)$$

상대적 residue는 특정한 신호에서 각 모드가 차지하는 상대적인 비중을 나타내는 것으로 모드의 중요성을 판단할 때, 하나의 기준이 될 수 있다. 위에서 기술한 변수들을 이용해서 전력계통의 저주파진동모드 선택 기준은 표 2와 같이 설정할 수 있다.

추정한 파라미터에서 저주파진동에 관심 있는 주파수대역에 포함된 모드들을 선택하고, 선택된 모드들 중에서 제동비와 시정수를 만족하는 모드들을 선택한다. 그리고 상대적 residue가 큰 모드들을 지배적인 저주파 진동모드로 선택한다. 보통 상용화된 고유치 프로그램에서 제동계수를 5%이하로 설정하고 있으나 보다 넓은 범위의 모드를 포함하기 위해서 제동계수를

표 2 저주파진동모드 선택기준

파라미터	범위
주파수	$0.2H_z \sim f < 2.5H_z$
제동비	$\zeta < 10\%$
시정수	$\tau > 2$
relative residue	$A_i > 0.1\%A$

10% 이하로 설정하고 시정수를 2초로 제한하였다. 이 기준으로 전체 계통의 동일한 모드에 대해서 참여지역을 구분하고, 광역진동을 파악할 수 있다.

3.3. 효율적인 저주파 진동모드 추정

저주파진동을 해석하기 위해서 iPIU에서 취득한 신호의 파라미터를 추정할 때, 적절한 샘플링과 시간구간이 주어져야 한다. 미지수를 p 라 할 때, 확장 Prony 법은 $p \times q$ 차의 선형예측행렬에 대한 최소자승연산과 차수가 p 차인 선형예측다항식의 해를 계산해야 한다. 따라서 주어진 데이터를 모두 이용할 때, 확장 Prony 법은 데이터 수와 미지수에 따라서 계산 시간이 좌우된다.

실시간 저주파진동 모드해석 관점에서 파라미터를 추정할 때, 중요 주파수 대역을 0.2~2.5Hz 이하로 설정할 수 있다. 따라서 최소 샘플링은 0.2초로 설정할 수 있으며, 저주파 진동을 해석하기 위해서 필요한 시간구간은 최소 10초로 설정할 수 있다. 그러나 실측한 이산데이터에는 백색잡음을 비롯한 다양한 잡음이 포함되어 있으므로 적당한 여유를 두어야 한다. 경험적으로 계산시간과 정확성을 고려할 때, 실시간 저주파 진동모드 추정에 적당한 샘플링은 0.05~0.2초이고, 시간구간은 5~30초가 필요하다.

3.4. 저주파진동 모드의 광역 해석

선형모델을 이용한 모드해석에서는 좌우고유벡터로부터 광역변수들 사이에 정량적인 값을 얻을 수 있다. 그러나 이산신호에서 모드해석은 각 신호마다 독립적으로 파라미터를 추정하기 때문에 계통 전체의 특성을 나타내는 정량적인 지표를 얻을 수 없다. 그러나 광역 신호들 사이에 발생하는 동조(sync)를 추정하면 실시간으로 광역변수들 사이에 정량적인 지표를 얻을 수 있다.

주파수와 계동계수가 동일한 모드에서 위상에 따라서 신호가 두 그룹으로 분리될 때, 각 그룹에 포함된 residue 벡터들의 합을 각각 ΣB_i 과 ΣB_s 라 하자. 두 값 중에서 ΣB_i 이 ΣB_s 보다 크다고 가정할 때, 동조지표(sync index)를 다음과 같이 정의한다.

$$S_i = \frac{\Sigma B_s}{\Sigma B_i} = S_m \angle \phi \quad (18)$$

여기에서 동조지표의 크기를 나타내는 S_m 을 크기동조지표(magnitude sync index)라 하고, 위상을 나타내는 ϕ 를 위상동조지표(phase sync index)라 한다.

크기동조지표 S_m 은 동조된 신호들 사이에 크기를 나타내고 있다. 만일 S_m 이 1에 근접하면, 두 신호 그룹의 residue 벡터 합이 비슷하므로 전체 진동에 비슷하게 참여하고 있고, 0에 근접하면, 하나의 신호 그룹이 전체 진동을 지배하고 있음을 알 수 있다. 위상동조지표 ϕ 는 신호들 사이에 동조된 상태를 나타내고 있다. 그러므로 위상동조지표 ϕ 가 0° 에 근접하면, 두 신호 그룹은 동일 위상으로 진동하고 있고, 180° 에 근접하면, 두 신호그룹은 반대 위상으로 진동하고 있다.

임의의 동적시스템에 외란이 발생하였을 때, 특정 모드에 대응하는 residue들이 다른 모드의 residue보다 큰 값을 가지고 있으면 특정 모드가 전체시스템진동(global system oscillation)을 지배하고 있고, 이때 특정 모드에 대한 동조지수로부터 전체시스템진동을 파악할 수 있다.

광역 계통에서 동조는 모든 발전기에서 출력된 신호에 동일 모드가 동일 시간에 포함되어 있다고 가정하고 계산한다. 그러나 실제 계통에서 계산한 진동 모드들은 동일하지는 않고 특정 주파수 부근에서 존재하므로 주파수 대역과 계동계수 범위를 정확하게 선택해야 한다. 또한 모든 발전기 모선에 iPIU가 설치되어 데이터를 취득할 수 있다고 가정하고 있으나 이것은 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 중요 지역 및 발전기에 설치된 iPIU에서 취득한 데이터로부터 광역진동의 모드 해석을 수행할 수 있도록 적당한 normalization이 필요하다.

4. 한전 계통 사례 연구

4.1. 전압안정도 감시 지수

iPIU로부터 얻어지는 실시간 계통정보만을 이용하여 계산하는 WAVI의 결과가 계통의 전압안정도를 얼마나 반영하는가에 대해서 사례연구를 시행하였다.

6개의 용통선로 양단에 iPIU를 설치(총 12개)하였다고 가정하고 WAVI를 계산한다. 계통의 감시선로를 그림 6에 나타내었다. 이때 사고 시나리오는 6개의 용통선로 중 765kV 용통선로를 제외한 4개의 용통선로 루트사고를 사용한다. 시모의 프로그램을 사용하여 전압 및 전류 정보를 만들어 WAVI를 계산하고, 정적 전압안정도 해석 프로그램을 이용하여 전통적인 전압안정도 해석 방법 중 하나인 PV해석을 같은 시나리오로 시행한다.

PV해석 결과와 WAVI의 결과를 그림 7에 나타내었다. PV마진이 가장 적게 나타나는 화성아산3 루트 사고의 경우에 WAVI의 값도 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, PV마진이 거의 떨어지지 않는 신용인신진천3루트 사고의 경우 WAVI의 값도 거의 변하지 않음을 확인할 수 있다. WAVI지수가 상정 사고의 심각한 정도를 잘 반영한다는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 전압 불안정 현상에 대하여 WAVI의 반영 정도를 확인하기 위해 순차적 사고 시나리오를 적용하여 WAVI결과를 확인하였다. 그림 6과 같은 계통을 사용하였으며 순차적 시나리오의 모의 시작 10초 후 신가평신택765kV 선로 1회선을 탈락시키고, 10초 후 신안성신서산765kV 선로 1회선을 탈락시키고, 10초 후 화성아산345kV 선로 1회선을 탈락시키고, 10초 후 서서울청양 345kV 선로 2회선을 탈락시키고, 10초후 신용인신진천345kV 선로 2회선을 탈락시키는 시나리오를 사용하였다. 그림 8에 이에 대한 결과를 나타내었다. 사고가 진행됨에 따라 수도권의 전압이 떨어지고 최종적으로 붕괴하는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 WAVI도 점차적으로 증가하여 1에 가까워짐을 확인할 수 있다.

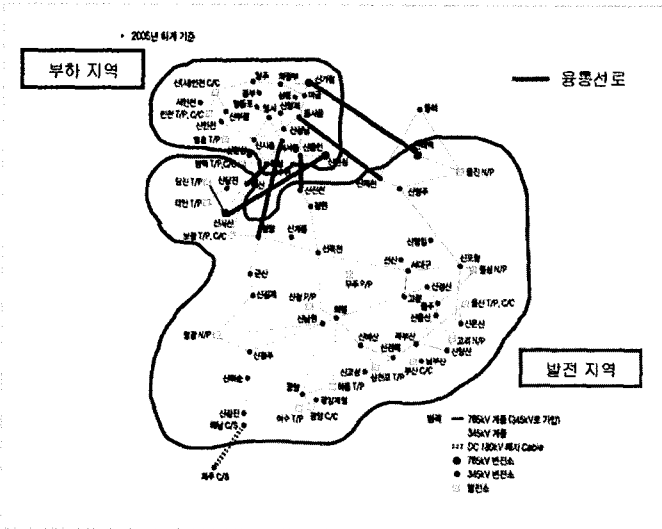


그림 6 우리나라 계통의 실시간 전압안정도 감시지역

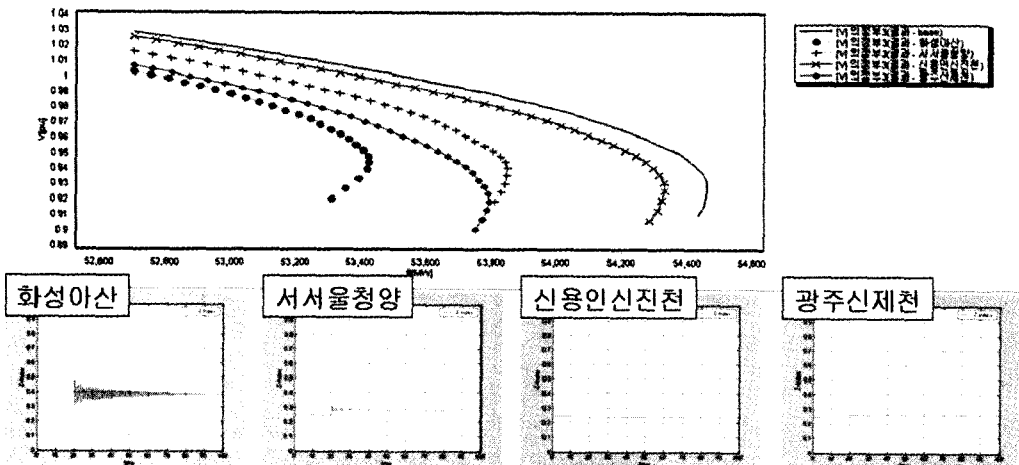


그림 7 PV마진과 WAVI

4.2. 저주파진동 해석

한전 계통에서 취득한 신호에서 저주파진동 특성을 해석하기 위하여 앞 절에서 기술한 진동모드 추정방법과 동조지수 추정 방법을 적용하였다. 한전계통에 대한 선형해석에서 많은 진동모드들이 계산되는데, 그 중에서 가장 제동특성이 나쁜 지역간 모드는 주파수 0.7Hz를 가지고 있는 모드로 고리-영광을 포함한 남부 지역 발전기와 울진-경인지역을 포함한 북부지역 발전기들이 서로 진동하고 있다. 현재 한전계통의 이산데이터를 취득하기 어려워 계통데이터에서 소프트웨어적으로 이산데이터를 취득하였다.

그림 9는 한전계통에서 각 발전기 유효전력의 시간 응답에 확장 Prony 법과 저주파진동의 동조선택기준을 적용하여 각 출력에 포함된 주요 진동모드와 residue를 계산하여 나타낸 것이다. 계통의 각 신호들에 포함된

모드들이 특정 주파수대역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 각 모드에 대한 residue에서 0.7Hz(4.3rad/sec) 모드와 1.0Hz(6.2rad/sec) 근처의 모드들이 큰 residue를 가지고 있다. 즉 한전계통에서 선로 6600-7100에 외란이 발생하였을 때, 0.7Hz 모드와 1.0Hz 모드가 한전계통에서 발생하는 진동을 지배하고 있다. 모드에 참여하는 발전기들을 구분하기 위하여 각 모드에 대한 residue를 그림 10에 나타내었다. 그 결과 그림 11에 나타낸 것과 같이 0.7Hz 모드는 고리-영광을 중심으로 한 남부지역 발전기와 울진-보령지역을 중심으로 한 북부지역 발전기들이 반대 위상으로 진동하고 있는 것을 알 수 있다. 반면에 1.0Hz 모드는 영광지역 발전기들과 서인천을 포함한 경인지역 발전기 그룹이 보령-태안지역 발전기들과 반대위상으로 진동하고 있다 한편 그림 9에 나타나있는 residue에서 동조지표(sync index)는 각각 다음과 같다.

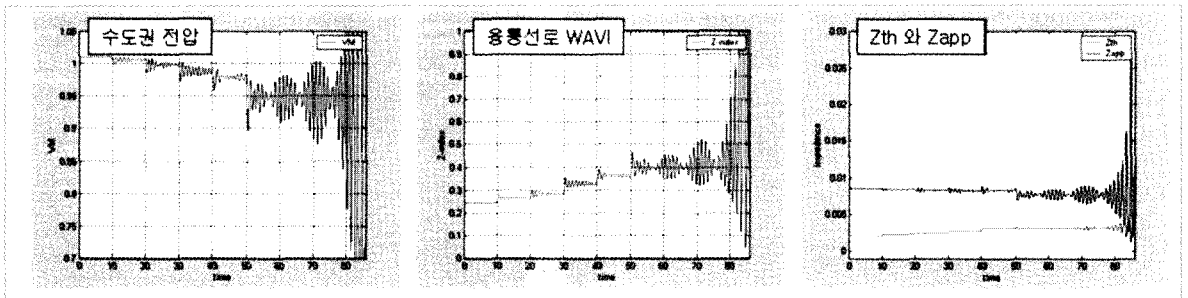


그림 8 순차적 사고 시나리오 WAVI 결과

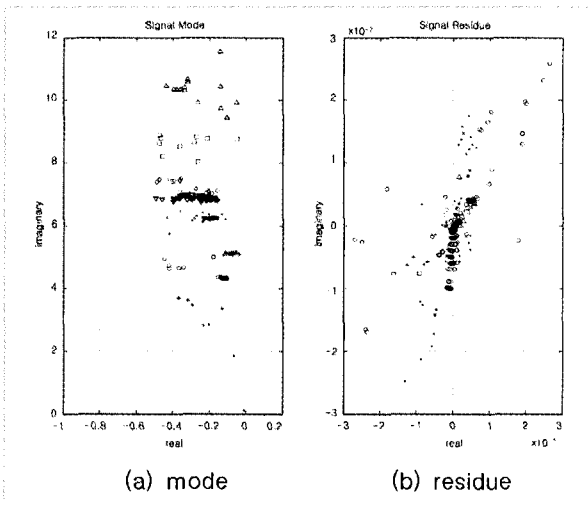


그림 9 Mode and residue(line 6600-7100)

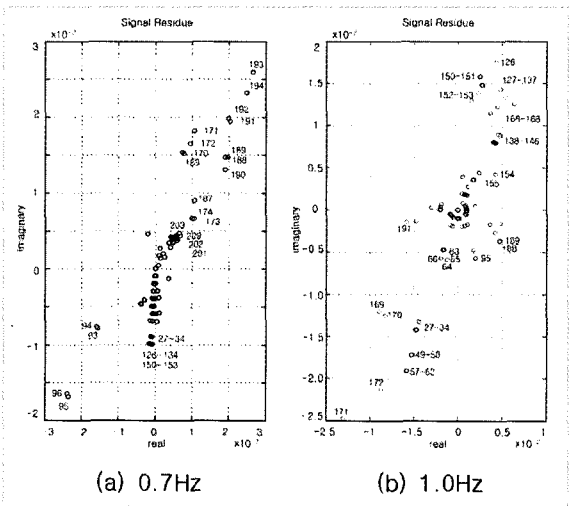


그림 10 Residue of 0.7Hz and 1.0Hz

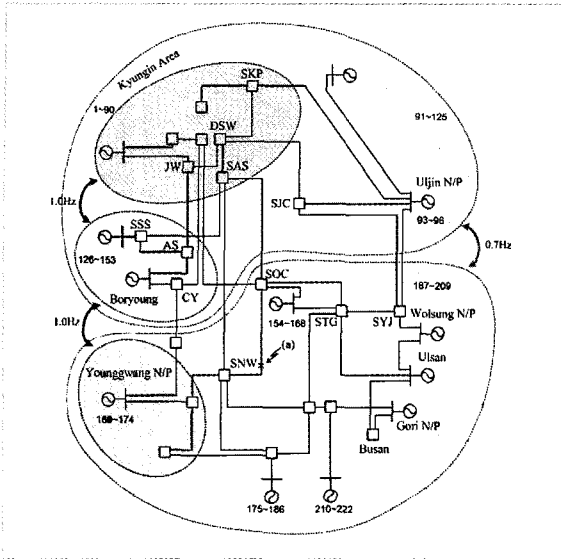


그림 11 Oscillation map

$$0.7\text{Hz} : S_i = 0.828 \angle 149.3^\circ$$

$$1.0\text{Hz} : S_i = 0.983 \angle 179.3^\circ$$

동조지표로부터 신호에 포함된 두 주파수에서 모두 반대위상으로 진동하고 있음을 알 수 있다. 특히 1.0Hz에서는 크기동조지표가 1에 근접하여 있고, 위상동조지표가 180° 에 근접하고 있다. 결과적으로 그림 11에 나타난 것과 같이 0.7Hz 모드에서 남부지역 및

북부 발전기들은 지역 내부 발전기들끼리 서로 동일위상으로 진동하고 있고, 남부지역과 북부지역 발전기들 사이에는 반대 위상으로 진동하고 있다. 1.0Hz 모드에서 서인천을 포함한 경인지역발전기들과 영광지역발전기들이 동일 위상으로 진동하고 있고, 이 발전기 그룹이 보령-태안지역발전기들과 반대 위상으로 진동하고 있음을 알 수 있다.

그림 12과 13에는 선로 4900-6600, 2500-5700의 고장에 대한 출력의 시간응답에 대해서 추정된 지역간 저주파진동을 나타내고 있다. 그림 12에 나타나있는 선로 4900-6600의 고장에 대해서 주로 1.0Hz 진동모드가 주어진 선로고장에 대해서 전체계통의 진동을 지배하고 있다. 이 경우에 1.0Hz의 residue 벡터에서 계산한 동조지표는 로 크기동조지표가 거의 1에 근접하고 있고, 위상동조지표는 180° 에 근접하고 있다. 따라서 지역사이에 신호들이 반대 위상으로 동조되어 진동하고 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 13에 나타나있는 선로 2500-5700의 고장에서는 0.7Hz 모드가 주어진 선로고장에 대해서 전체계통의 진동을 지배하고 있다. 이 경우에 0.7Hz의 residue 벡터에서 계산한 동조지표는 로 영광-고리 등의 남부지역발전기가 0.7Hz 진동을 크게 지배하고 있고, 위상동조지표는 180° 에 근접하고

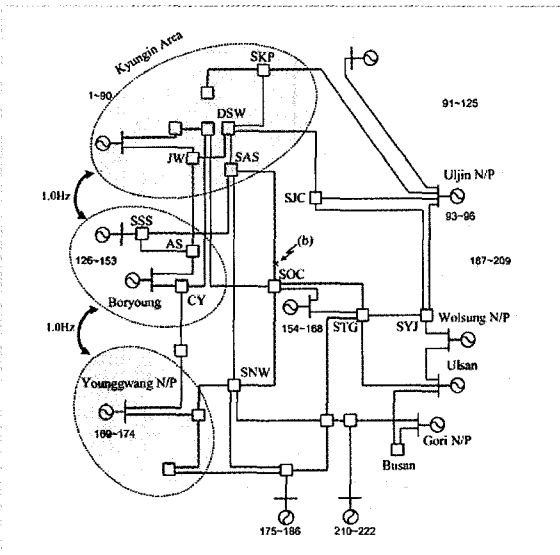


그림 12 Oscillation map

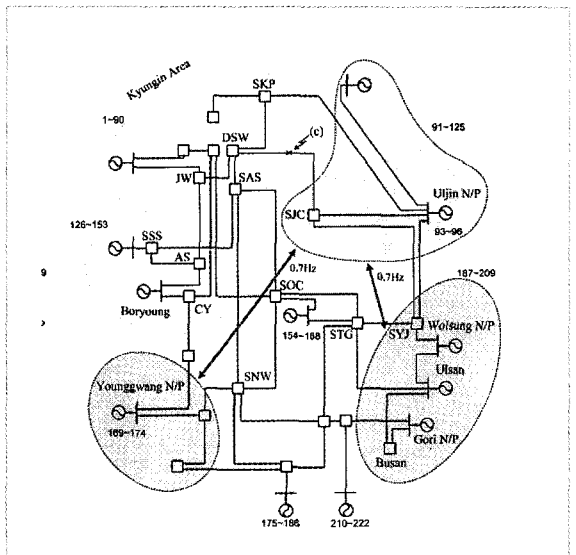


그림 13 Oscillation map



있어 울진지역발전기와 영광-고리 지역 발전기 사이에 출력들이 반대 위상으로 동조되어 진동하고 있다.

5. 결 론

본 원고는 실시간으로 측정된 데이터에서 전압안정성과 미소신호안정성을 평가하는 기술에 대하여 기술하고 있다. 계통에 설치된 iPIU의 개수와 위치에 따라 지역 및 광역 전압안정도 감시지수를 통하여 계통의 전압안정성을 판별하였다. 그리고 전압안정도 감시지수 한계계통에 적용하여 기존의 전압안정도 해석지수들과 비교하여 개발한 전압안정성 평가 기술의 정확성을 검증하였다. 또한 전압이 붕괴되는 시나리오를 작성하여 이에 따라 광역전압안정도 해석 지수인 WAVI의 효율성과 정확성을 검증하였다. 향후 iPIU를 활용한 지속적인 전압안정도 감시 방법과 WAVI와 같은 광역 전압안정도 해석 지수의 개선은, 실시간으로 계통의 전압안정성을 평가할 수 있는 새로운 전압안정도 감시 방안이 될 것이다.

또한 전력계통에서 측정된 이산데이터에 포함된 중요 저주파진동 파라미터를 추정하여, 실시간 미소신호안정도 감시를 위한 방법을 개발하였다. 계통에서 측정할 수 있는 다양한 이산신호에서 저주파진동 모드의 파라미터를 추정하기 위하여 확장 Prony 법과 DFT 법을 적용하고, 다양한 시험함수를 통하여 각 알고리즘들을 검증하였다. 그리고 전력계통의 이산신호에서 저주파진동 모드를 효율적으로 추정하기 위해서 진동모드 선택기준을 제시하였으며, 미소신호안정도에 적합한 샘플링 및 시간 구간을 제시하였다. 또한 시각동기화 된 신호를 이용한 광역모드 해석을 위해서 동조의 개념을 도입하여, 광역해석을 위한 정량화된 동조지표를 정의하였다. 실시간 광역계통에서 취득한 이산데이터에서 계통의 안정도 해석과 운용 및 설계에 필요한 좋은 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

- [2] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargave, K. Vu, J. Cole, "Dawn of the grid synchronization", Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 6, pp.49-60, 2008.
- [3] D. Atanackovic, J. H. Clapauch, G. Dwemychuk, J. Gurney, H. Lee, "First steps to wide area control", Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 6, pp.61-68, 2008
- [4] C. W. Taylor, D.C. Erickson, K.E. Martin, R.E. Wilson, V. Venkatasubramanian, "WACS-Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, pp.892-906, May 2005
- [5] H.S. Campeanu, E. L'Helguen, Y. Assef, N. Vidal, S.C. Savulescu, "Real-Time Stability Monitoring at Transelectrica", PSCE '06. IEEE PES, pp.1-5, Oct. 29-Nov. 1 2006
- [6] CIGRE Working Group, "Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement", Cigre Technical Brocher Final Report, January 2007.
- [7] D. E. Julian, R. P. Schulz, K. T. Vu, W. H. Quaintance, N. B. Bhatt and D. Novosel, "Quantifying Proximity To Voltage Collapse Using The Voltage Instability Predictor(VIP)," 2000 IEEE, Jul.2000.
- [8] Mats Larsson and Joachim Bertsch, "Monitoring and Operation of Transmission Corridors,"Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 23-26 June 2003, on page:8pp. Vol.3.
- [9] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, pp.80-89, Feb. 1990.
- [10] W. L. Briggs, V. E. Henson, The DFT, An Owner's Manual for the Discrete Fourier Transform, SIAM, Philadelphia : 17-59, 1995