

MLE Based Power System Oscillation Detector by Using Measurement Data

최대 리아프노프 지수를 활용한 전력계통 측정 데이터 기반 비선형 동요 현상 검출 방안

Hwanhee Cho¹, Byongjun Lee^{1†}, Suchul Nam², Yonghak Kim²
조환희¹, 이병준^{1†}, 남수철², 김용학²

Abstract

본 연구는 시각 동기 위상 측정 정보를 이용하여 전력계통에 나타나는 여러 가지 동요 현상을 검출하기 위한 기초 연구로써, 시계열 데이터 분석 분야로 분류된다. 제시한 방법은 비선형 동특성에 해석 기반으로 접근하여 전력계통에 나타날 수 있는 여러 동요 현상을 범용적으로 검출해 낼 수 있다. 비선형 동요 현상의 신호적 패턴을 수학적으로 기본 순시치 파형으로부터 피크치 샘플링을 통해 전개하여 계통 요소간 간섭으로 인한 원하지 않는 진동 모드를 검출하고자 한다. 계통의 변화로 진동 모드가 나타날 때, 2차원 평면에 실효치로 환산한 시계열 전압 데이터와 선형화된 플로케트 상수(Floquet multiplier)를 맵핑하여 도시하고, 정상상태 지점으로부터 거리를 계산하여 최대 리아프노프 지수 계산을 통해 계통이 불안정하게 되는 시간을 시계열 데이터 분석으로 추정하는 것이 본 방법의 핵심이다. 이러한 접근으로 제시한 비선형 동요 검출 알고리즘을 적용하여 디지털 필터 적용 또는 주파수 영역 해석과 같은 오프라인 Study와 달리 온라인으로 신속하게 계통의 현재 상태를 알 수 있게 된다.

Keywords: Power System Measurement, Power System Oscillations, Subsynchronous Resonance, SSR, Time Series Analysis, Poincare Mapping

1. 서론

최근 재생에너지원과 같은 전력전자기반 설비가 급속도로 증가하고 있고 대규모로 계통 접속 계획이 수립되고 있다 [13]. 이전 조사 보고서 [13]에 의하면, 기존 계통과 전력 제어 소자 또는 수동 소자가 높은 수준의 간섭을 일으킨다는 이슈가 있으며 이는 계통 운영 조건을 더욱 혹독하게 할 수 있다고 언급하였다. 여러 연구자들은 교류 시스템 구성 요소와 재생에너지원 같은 인버터 기반 설비들 간의 상호 작용을 집중적으로 조사하였다 [16][17]. 일반적으로 SSR (Sub-Synchronous Resonance; 축비틀림 모드) 분석은 30~40년에 걸쳐 연구된 주제이며 제어하여 완화할 방안 도출까지 나온 성숙단계의 주제이다 [1]-[4]. 비선형 동요 현상의 상향식 접근법은 고유치 해석, 주파수 스캐닝 및 전체 시간 영역 해석을 포함한다, 그러므로 실제 상호작용 이슈를 상향식 접근법으로 수행하기 위한 조건은 여자시스템, 조속기, 계통 안정화

장치(PSS) 등의 제어기 모델링과 더불어 발전기의 다축 터빈의 상세 모델링이 필수적이다.

이러한 상향식 접근 중 하나로 HVDC 및 풍력발전기와 계통 내 요소 간의 상호작용을 분석한 사례가 있다. [1]은 Sub-synchronous Torsional Interaction (SSTI)를 MMC VSC HVDC의 상세 모델링과 발전기의 다축 모델을 이용하여 분석하였다. [3]에서는 Sub-synchronous Control Interaction (SSCI)는 이중여자 유도 발전기 또는 타입-3 풍력발전기와 직렬 보상 설비가 설치된 경우 관찰된 사례 및 매커니즘을 소개한다. 직렬 보상기가 발전기 축과의 공진 조건이 되면 공진에 의한 전류가 DFIG의 회전자로 흐르게 된다. 그 결과 공진에 의한 전류는 회전자의 슬립이 음의 값이 되게 하고 발전기는 음의 댐핑이 된다. 결국 음의 댐핑값은 Sub-synchronous 작용을 일으켜 계통의 신뢰도와 안정도를 악화시키게 된다.

비선형 동요 현상을 상세 모델링을 활용하여 분석함과 더불어 실제 계통의 운영에 있어서는 하향식 방법으로 측정

Manuscript received July 2, 2018, Accepted November 12, 2018

¹ School of Electric Engineering and Electronics, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02861, Korea

² KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

† leeb@korea.ac.kr

This paper is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper and/or Supplementary information is available at <http://journal.kepcoco.kr>.

정보 기반으로 온라인으로 현상 및 위치 검출 등의 상황 인지 요소도 중요하게 대두되고 있다. 여러 연구자들은 취득된 측정 정보를 이용하여 계통의 비선형성을 바탕으로 한 안정도 감시 지수를 연구하고 있다. 동적인 해의 수렴성 또는 안정성을 계통에서 측정된 정보를 통해 나타내기 위한 방법 중의 하나로 최대 리아프노프 지수(Maximum Lyapunov Exponent; MLE)를 이용하고 있다 [5]-[8]. 시계열 데이터에 대한 MLE 계산은 현재 계통의 실질적인 상태를 추정하여 나타내 준다. [8]에서는 MLE를 과도안정도 평가에 활용하고 있는데, 여기서는 측정된 개별 모션 전압의 안정도를 평가한 결과가 대부분 전체 계통 안정도에 기여함을 여러 과도안정도 시뮬레이션 결과를 통하여 밝혀냈다. 해당 논문의 결과에서 나타난 안정도의 척도는 고장 제거 후의 전압 파형에 대한 전압이 불안정(안정)하면 MLE는 양수(음수)가 된다는 것이다. 반면, 지속되는 진동의 경우에는 플로케트 상수 계산이 효과적으로 주기적 안정성을 나타낼 수 있는 수학적 틀이며 여러 공학 영역에서 사용된 바가 있다. MLE와 유사한 방법으로 플로케트 상수도 초기치 변화에 대한 시스템 행렬의 고유치이지만, 진동의 주기가 고려된다. 초기치 변화 행렬을 구축할 경우 시스템의 모든 상세 모델링 정보가 필요하게 된다. 그러나 푸앵카레 평면(Poincare map)은 주기적 궤적에 대한 안정도를 표현해 줄 수 있는 유용한 방법이다 [12]. 이러한 푸앵카레 평면 구축 방법의 기하학적인 개념을 샘플링 개념으로 시계열 데이터 분석에 채용하면 동요 현상이 발생하는 비선형 시스템의 플로케트 상수를 잠재적으로도 추정해 낼 수 있다.

본 연구는 비선형 동요 현상에 관한 지수를 나타내기 위하여 순시치의 피크값 샘플링 개념을 수학적으로 전개한다. 순시치의 피크 데이터가 취득되면 최대값과 2차원 평면으로 용이하게 도시할 수 있게 된다. 제시한 방법은 또한 기본 순시치 물리량 뿐만 아니라 시스템 응답에 다른 모드 혼합된 신호에서도 적용될 수 있다. 순시치에 대한 적용과 더불어 실험치의 적용도 유사한 절차로 나타낼 수 있다. 최종적으로는 MLE 방법까지 포함되어 본 논문의 개념이 완성된다.

본 논문은 주기적인 해의 특성에 관해 소개하고, 기본 순시치 및 다른 진동 모드가 포함된 순시 신호의 피크값의 수학적 전개, 그리고 시계열 데이터의 2차원 맵핑 개념과 MLE 알고리즘 적용을 통한 비선형 동요 현상 인덱스화 순서로 진행된다. 제시한 방법의 검증은 샘플 계통을 통해 수행하였고 계통 강건도 및 상호 작용에 관해서 논의하고자 한다.

II. 주기적인 해의 안정성

전력계통의 동적 시스템과 t_0 에서의 초기치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = f(t, x, u), x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

만약 위 식을 선형시스템으로 근사화하면 안정도는 시스템 행렬 실수부 고유치의 부호를 통하여 결정된다. 그러나 선형화하기 어려운 비선형성이 강한 시스템에서는 다른 방법으로 접근하여 안정도를 평가할 수 있다. 그 중에서 MLE는 시간 종속적인 해의 안정도에 관한 직접적인 정보를 줄 수 있다. MLE가 음수(양수)라면 외란 후의 해의 동요는 줄어드는

(늘어나는) 방향이다. 그러나 해가 지속적으로 진동한다면 플로케트 상수와 같은 다른 방법으로 접근해야 한다.

A. 푸앵카레(Poincare) 평면

푸앵카레 평면은 비선형 시스템의 진동 해석 측면에 특화되어 기하학적으로 동특성을 해석할 수 있는 중요한 방법으로 플로케트 상수의 개념까지 확장된다. 푸앵카레 평면법은 이론적으로 해의 주기적인 궤적의 안정성과 관련한 정보를 분명히 나타내 주고 있다. 푸앵카레 평면법의 형성 조건은 다음과 같다.

- 1) 궤적이 평면과 항상 직교할 것.
- 2) 궤적이 평면과 항상 같은 방향으로 교차할 것.

예를 들어, 만약 평면 P 내부에 두 조건에 해당하는 점 q 가 존재할 때, 이 평면의 이산시간 n 은 교차점의 수와 같고, 항상 해의 주기 T 와 부합한다. 시계열 벡터에서 위 두 조건을 맞추기 위해서는 이론상으로는 해의 극점이 모두 평면 P 집합에 속한다.

만약 푸앵카레 평면이 다음과 같은 안정점을 형성한다고 가정하면,

$$P(q^*) = q^* \quad (2)$$

주기적인 해는 Attractor가 된다. 그러므로 주기적인 진동의 안정성은 해가 해의 고정점 q^* 로부터 attracting 또는 repelling 하는가이다.

B. 플로케트 상수(Floquet Multiplier)

위 푸앵카레 평면이 정성적인 해의 안정성에 관한 답을 준다면, 플로케트 상수는 이를 정량적으로 나타내 줄 수 있는 지표이다. 플로케트 상수는 단위 주기에서 시스템의 동적 상태에 대한 행렬의 고유치로 정의되어 있다. 이 때, 시스템의 동적 상태는 초기치에서 작은 외란을 주면 결정된다고 본다. 푸앵카레 평면상 미지의 지점을 $P(q)$ 라고 할 때,

$$P(q) = P(q^*) + \frac{\partial P(q^*)}{\partial q}(q - q^*) + \text{고차항} \quad (3)$$

이 때, Eq. (1)에서 임계 플로케트 상수를 μ_1 , 그 때의 고유벡터를 q_1 이라고 할 수 있고, 순차적으로 전개해보면,

$$P(q) - q^* = \left[\frac{\partial P(q^*)}{\partial q} \right] (q - q^*) \quad (4)$$

$$P(q_1) - q^* = \mu_1 (q_1 - q^*) \quad (5)$$

또는

$$P(q_1) = \underbrace{\mu_1 q_1}_{\text{linear}} + \underbrace{(1 - \mu_1) q^*}_{\text{nonlinear}} \quad (6)$$

Eq. (5)로부터 간소화된 플로케트 상수는 간단히 푸앵카레 평면과 교차하는 시계열 벡터의 변화율로 볼 수 있다. 따라서 이는 순시치의 극소값 또는 극대값과 일치하게 된다. 이

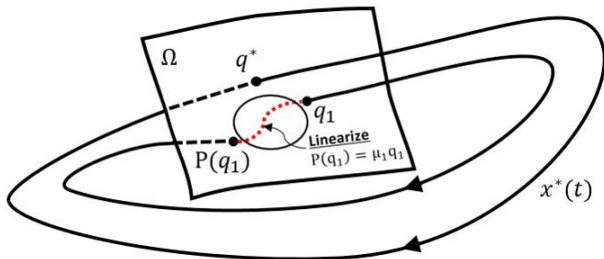


Fig. 1. 비선형 시스템의 해와 푸앵카레 평면의 개념도.

러한 사실로 미루어 플로케트 상수의 추정값이 1보다 작아지는 방향이면 안정 진동 해, 커지면 불안정한 진동 해라고 판단할 수 있게 된다. Eq. (6) 우변의 좌항은 선형 영역, 우항은 비선형 영역으로 또 나눌 수 있다. 여기서 만약 해가 안정하면 식은 선형화 가능해지고 q_1 과 $P(q_1)$ 이 선형 관계를 띄게 된다. 반대로, 불안정 해는 q^* 와 μ_1 값을 미지량으로 남겨두게 된다. 그러나 본 연구는 이러한 미지의 비선형 요소를 무시한다고 가정한다. 따라서 Eq. (6)은 항상 선형으로 가정하고, Fig. 1은 이러한 푸앵카레 평면과 플로케트 상수를 개념적으로 표현한다.

III. 시계열 벡터의 기하학적 표현

n 차 미분방정식으로 표현되는 상태공간을 고려할 때, 일반적인 해 궤적의 방향은 유용한 정보를 주기 어렵다. 그러나 순시 시간 영역에서 같은 기울기에 해당하는 시계열 벡터의 극대점 및 극소점을 계산할 수 있으면 직접적으로 푸앵카레 평면을 구성할 수 있다. 구체적으로 극소점과 극대점간의 편차는 해당 순시 신호의 크기로 나타낼 수 있다. 그러므로 평면상에 구성된 시계열 데이터는 각각 크기 축과 추정 플로케트 상수로 표현될 수 있는 것이다.

A. 피크치의 수학적 표현

계통의 정적 상태에서 순시시스템에서 상태 방정식의 해는 다음과 같이 기본 삼각함수 꼴로 표현된다.

$$x_0(t) = \sqrt{2}X_{m0}\cos(2\pi f_0 t + \theta_0) \quad (7)$$

위 식의 미분을 취하면,

$$\frac{dx_0(t)}{dt} = -2\pi\sqrt{2}f_0 X_{m0} \sin(2\pi f_0 t + \theta_0) \quad (8)$$

특정 시간 τ 와 자연수 n 에 대하여, 극대점/극소점의 표현은 다음과 같다.

$$f_0 X_{m0} \sin(2\pi f_0 t + \theta_0)|_{t=\tau} = 0 \quad (9)$$

$$2\pi f_0 t + \theta_0 = 2\pi n \quad (10)$$

결과적으로 원 신호의 피크 샘플링에 관한 수식은 다음과 같이 표현할 수 있고, 푸앵카레 평면상의 고정점 q^* 에 해당하는 점이라고 볼 수 있다.

$$x_0[n] = \sqrt{2}X_{m0}\cos(2\pi n) \quad (11)$$

순수 전기적인 요소에 의한 현상이 아닌 외부적인 조건에 의해 비선형 진동 모드가 나타나게 될 경우의 모드(Local machine, Inter-unit, Inter-area, Torsional mode)는 아래와 같이 $x_1(t)$ 와 같이 표현된 신호와 기본 삼각함수 꼴의 신호 $x_0(t)$ 가 합성된 꼴로 표현된다. 추가적인 모드 $x_1(t)$ 와 합성된 신호의 시간 미분값은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$x_1(t) = \sqrt{2}X_{m1}\cos(2\pi f_1 t + \theta_{10}) \quad (12)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = -2\pi\sqrt{2}f_0 X_{m0} \sin(2\pi f_0 t + \theta_0) + f_1 X_{m1} \sin(2\pi f_1 t + \theta_{10}) \quad (13)$$

미분식의 간략화를 위하여 여기서 새로운 상수 α 를 도입하여 치환하는데, 미분해서 0이 되는 시간 $t = \tau$ 와 합성 신호의 피크 샘플링은 결국 아래와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_0} (2\pi n + \alpha - \theta_0) \quad (14)$$

$$x[n] \approx \underbrace{\sqrt{2}X_{m0} \cos(2\pi n)}_{\text{고정분}} + \underbrace{\sqrt{2}X_{m1} \cos\{2\pi \frac{f_1}{f_0} n + (\theta_{10} - \frac{f_1}{f_0} \theta_0)\}}_{\text{변동분}} \quad (15)$$

도입한 작은 상수 α 를 0에 근접시키게 되면 이산 샘플링 신호 (15)는 두 개의 요소로 분할되게 된다. 즉, 우변의 좌항은 Eq. (11)과 같이 고정 신호분이고, 우항은 자연수 n 에 따라서 변하게 되므로 변동 신호분으로 정의할 수 있다. 부가적인 설명을 하자면, 변동분 중 기본 주파수 대비 합성 주파수에 따라서 결과가 다르게 나타나는데, 계통 진동 모드는 고조파와는 달리 주로 자연수가 아닌 주파수이므로 거의 비슷한 양상을 띠다고 볼 수 있다. Fig. 2에서 순시치 시계열 데이터 시각화를 위해 설정한 비정형 주파수는 40.20 Hz로 표현된다.

Eq. (15)와 같이 우변의 변동분은 삼각함수 꼴을 취하며 변동한다. 이는 해당 신호의 이산 Cosine 함수의 형태를 취한다는 것이다. 반대로, 미분에 해당하는 신호의 변화율을 통해 계산되는 플로케트 추정 상수는 이산 Sine 함수 형태를 취하게 된다. 따라서 이 계산된 두 신호를 한 평면에 맵핑하게 되면 Fig. 2와 같이 고정점(붉은색) 주위에 타원형 궤적(푸른색)을 형성하게 된다. 따라서 직관적으로 계통에 비선형 동요 현상이 일어나게 되면 구축한 시계열 평면에서는 그 크기가 증가하는 원형 궤적의 형태로 될 것을 예상할 수 있다.

IV. 최대 리아프노프 지수를 활용한 비선형 동요 검출

본 Section에서는 위 개념의 실효 신호 및 시스템으로의 확장과 함께 비선형 동요 검출 과정을 설명할 것이다. Fig. 3은 제안한 비선형 진동 검출기의 개요도이다.

A. 실효치 변화량과 플로케트 추정 상수와의 관계

Eq. (16)은 진동 모드 합성 순시 신호의 실효치 계산식이다.

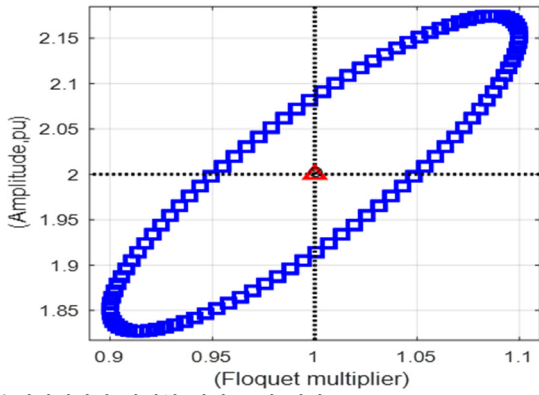


Fig. 2. 순시치에서의 시계열 평면 도식 결과.

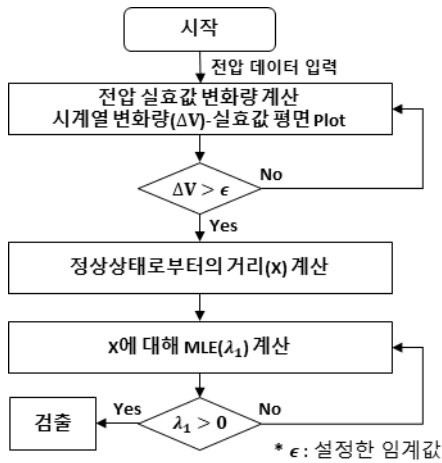


Fig. 3. 비선형 동요 현상 검출 개요.

$$X[k] = \left(\frac{1}{T_0} \left[\int_k^{k+T_0} x_0^2(t) dt + \int_k^{k+T_0} x_1^2(t) dt + \int_k^{k+T_0} 2x_0(t)x_1(t) dt \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Eq. (16)은 세 항으로 이루어져 있고 첫 번째 및 두 번째 항은 바이어스 시키는 고정 상수 형태이고 세 번째 항은 k 에 따라 변화하는 변동분이다. 따라서 합성된 순시 신호에 대한 실효치를 구하게 되면 주파수 f_0 - f_1 Hz로 진동하는 신호가 된다. 추가적으로, 데이터 샘플링의 관점에서 각 계산된 실효값 사이에는 최소한하나의 순시 최대값이 포함되게끔 되어 있으므로 순시 데이터에 대한 피크 추적 샘플링은 사실상 불필요한 과정이 된다. 그러므로 푸앵카레 평면은 더욱 간단히 실효치의 변화율과 크기에 대한 관계만 살펴보면 된다. 그에 따른 비선형 동요는 위의 순시치에서 언급한바와 크게 다르진 않다.

B. 최대 리아프노프 지수 계산을 통한 비선형 동요 감시

시계열 평면에 맵핑된 각 데이터 취득 후 정상 상태의 고정점(고장 발생 후 계통 변화가 없다고 가정)으로부터 도시된 각 점까지의 유클리드 거리를 계산할 수 있다. 이 거리를 감시하면서 임계값을 정하여 진동 발생 여부를 결정할 수 있다. 하지만, 이 임계값들은 계통의 상태에 따라, 발생한 비선

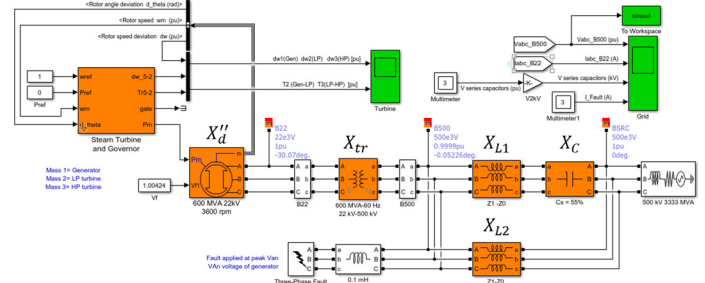


Fig. 4. Steam turbine and governor system - Sub-synchronous Resonance.

형 동요의 종류에 따라 다르게 가져가야 하므로 본 제안한 방법은 이러한 진동의 검출을 위하여 시계열 최대 리아프노프 지수 [8]를 도입하였다.

$$\lambda_i(k\Delta t) = \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \log \frac{|x_{(k+m)\Delta t}^i - x_{(k+m-1)\Delta t}^i|}{|x_{m\Delta t}^i - x_{(m-1)\Delta t}^i|} \quad (17)$$

[8]을 포함한 시계열 MLE를 사용한 여러 논문에서는 주로 계통에서 취득된 개별 모선의 전압 데이터의 적용을 통한 계통의 불안정 판단 지수로 사용하였다. 그러나 제안된 방법에서 시계열 MLE 알고리즘을 사용한 주된 목적은 데이터 변화에 민감하게 산출되는 MLE 알고리즘의 특성을 이용, 비선형 동요 현상을 조기에 포착하여 계통 운전원이 조치를 취할 수 있도록 하는 것이다. MLE의 정의에 의하면 음의 값은 시스템 응답이 안정하다는 것을 의미하고, 반대로 양의 값이 나타나면 시스템의 응답이 발산한다는 것이다. 보통 여기서 시스템 응답은 상태변수의 변화로써 적용할 수 있겠지만, 본 논문에서는 초점이 비선형 동요 현상에 맞추어 있으므로 위에서 도출한 시계열 평면상의 거리 개념으로 접근하였다.

V. 최대 리아프노프 지수를 활용한 비선형 동요 검출

본 Section에서는 앞서 나타난 방법을 이용하여 예시계통에 적용한 사례를 보여준다. 사례는 Fig. 4와 같이 MATLAB에서 기본적으로 제공하는 SSR 계산 예제를 적용하였다 [14]. Fig. 4서 발전기와 계통간의 약한 접속과 간섭 조건이 맞을 때 전압 등 데이터에서 축비틀림 모드가 관찰되는 사례이다. 이는 전형적인 Torsional mode이고 계통에 투입된 직렬보상으로 인한 계통 주파수의 변화가 다축 발전기의 고유 주파수와 인접하거나 겹치게 되어 발생한다.

이 시뮬레이션 상에서 보상 수준은 기본 55%로 맞추었으며, 발전기의 리액턴스와 변압기의 임피던스는 송전선의 리액턴스에 비하여 대략 4배 크며 이러한 연결성 조건에 관해 뒤에 논의하고자 한다. 순시치에 대한 Reporting rate는 15로 설정하였으며, 샘플링 주파수는 60 Hz로 맞추었다. Fig. 5부터 Fig. 9는 측정된 실효 전압과 주파수 분해 결과, 푸앵카레 평면, 정상상태부터 거리 계산 그리고 진동 검출을 위한 MLE 계산 결과를 나타낸다.

실효치와 변화율 계산을 통해 도시한 푸앵카레 평면 Fig. 7을 보면, 붉은색으로 표시된 정상상태 지점으로부터 과란색 점간의 거리가 고장 전에 0으로 유지되다가, 고장 발생 시 비약적으로 커지고, 이후에는 점점 커지는 양상을 볼 수 있

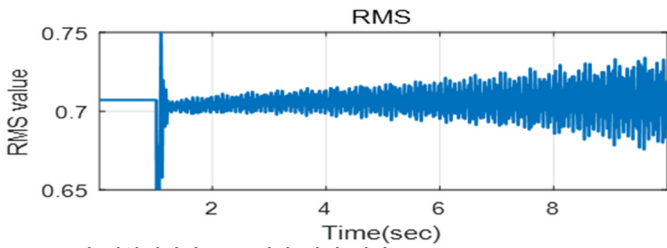


Fig. 5. 모선 전압에서의 SSR 현상 확인 결과.

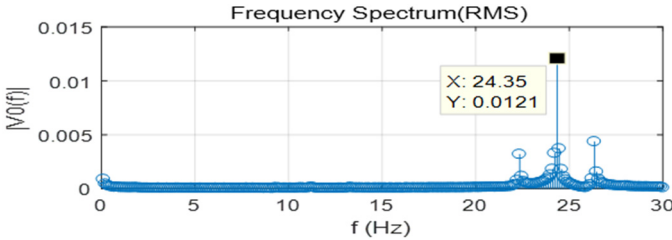


Fig. 6. 주파수 해석 결과.

다. 그리고 Fig. 8과 같이 계산한 유클리드 거리 X 에 대하여 MLE 계산을 수행하면 Fig. 9와 같이 초기 1.739초부터 계속 불안정한 영역으로 도시되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 최종 MLE는 +0.3450이 도출된다. 그리고 다축이 아닌 기준 발전기 모델을 적용하면 그림에서도 알 수 있듯이 진동이 나타나지 않으며, MLE는 -0.2854로 계속 안정한 것을 알 수 있다.

A. 직렬 보상 수준에 따른 비선형 동요 관찰 결과

직렬 보상 수준에 따라 우선 Fig. 10과 같은 주파수 스키텀을 수행하였다. 계산한 등가 리액턴스 값은 발전기로부터 계통의 등가 리액턴스로 43.30~45.00 Hz 사이에서 음의 값을 갖는다. 등가 리액턴스가 음의 값을 갖는 주파수 영역에서는 축비틀림 모드가 관찰될 수 있다. 해당 주파수 대역에서의 선로 직렬 보상은 52.08~56.25%에 해당하며, 사실상 Torsional mode가 나타나는지의 여부를 알기 위해서는 기계적 시스템과 전기적 시스템의 상세한 고유치 해석이 필요하다.

[9]에서 보인 것처럼, 3-mass 발전기는 스윙 모드와 함께 두 개의 Torsional mode가 관찰된다. 참조문헌에서 언급한 바와 관련하여, 직렬보상의 변화에 따라 24.70 Hz에서 첫 번째 Torsional mode에 도달하여도, 해당 영역에서는 상호작용이 충분히 강하지 않아서 계통의 안정도에 영향을 미치지 않는다. 이때는 계통의 댐핑이 충분히 커서 진동이 계통에 영향을 크게 미치지 않는다는 것을 의미하고 고유치의 실수부는 좌반면에 있게 된다. 그러나 두 번째 Torsional mode인 32.40 Hz일 경우, 고유치의 실수부는 우반면으로 옮겨지게 되어 진동이 커지는 양상을 보이고 이때가 SSR 현상이라고 볼 수 있다. 그러므로, 본 논문에서는 실질적인 MLE 계산을 통하여 진동이 발생해 계통에 악영향을 미치는 영역을 찾아내었다.

Fig. 10은 위 비선형 이론적으로 찾아낸 비선형 동요 현상을 MLE 계산을 통하여 경험적으로 찾아낸 결과와 나타낸다. 각 막대당 10초간의 시뮬레이션을 통해 계산한 MLE 결과이다. 따라서 비선형 동요 현상이 관찰되는 범위는 45.302

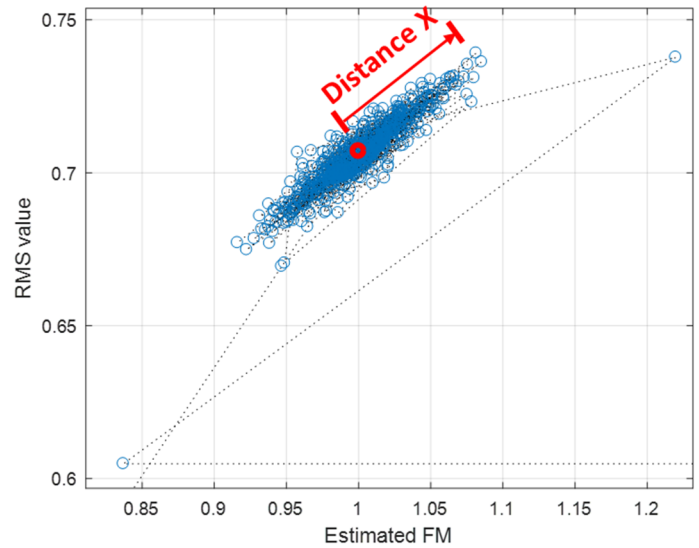


Fig. 7. 시계열 평면 상의 SSR 감시 결과.

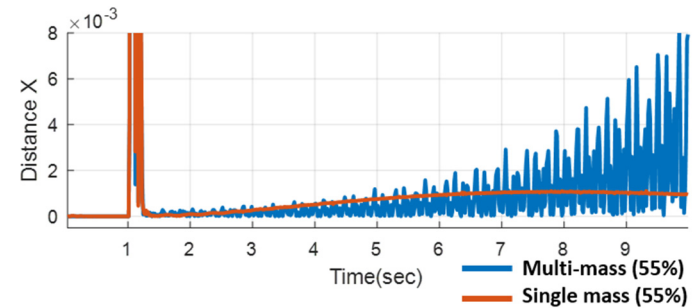


Fig. 8. 시간에 따른 진동 거리 계산 결과.

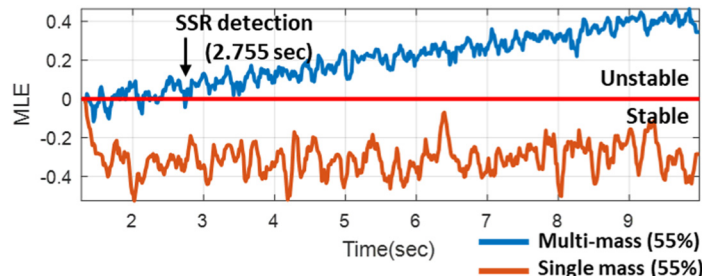


Fig. 9. 거리에 따른 MLE 계산 결과.

~59.219%까지 더욱 광범위한 영역으로 나타난다. Table 1은 비선형 동요 검출 지수를 보여주며, 표시한 검출 시간은 계산한 MLE 결과가 양수가 되는 순간을 표시한 것이다.

VI. DISCUSSION

이전 Section에서 여러 직렬 보상 적용 Case에 따라 제안한 방법을 적용하여 비선형 동요 현상을 검출하였다. 본 섹션에서는 계통 강건성과 비선형 동요 현상의 관계를 관찰하고자 한다. SCR은 [16], [17]에서와 같은 방법으로 계산한 결과이다. Table 2는 변압기 리액턴스 X_{tr} 을 기준 12%에서부터 줄이면서 MLE가 얼마나 더 불안정해 지는지 관찰하였다. 변압기 리액턴스가 줄어들수록 발전기의 계통 접속점 사이의 연결성이 강해진다. 그러나 계산된 MLE는 점점 안정해 나

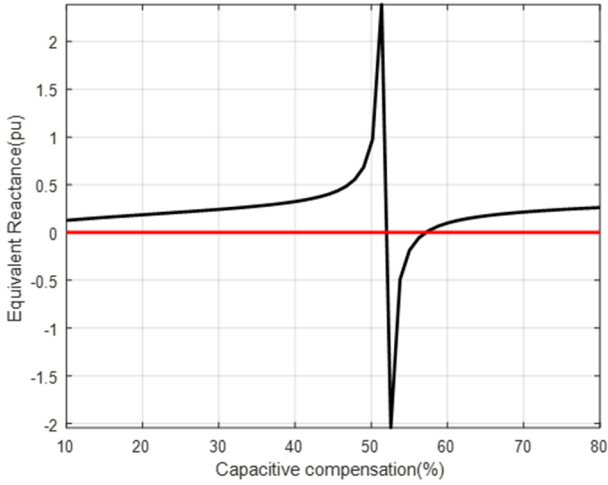


Fig. 10. 주파수 스캐닝 결과.

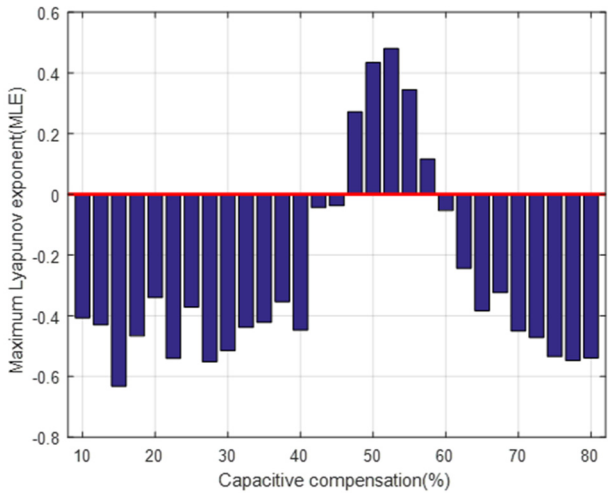


Fig. 11. 제안한 방법을 적용한 경우 SSR 관찰.

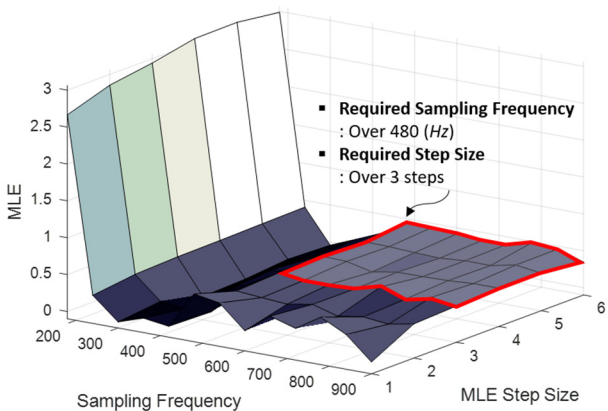


Fig. 12. 제안한 방법을 적용하기 위한 샘플링 주파수 조건 검토.

타난다. 이는 전기적 시스템과 기계적 시스템의 연결이 강해지기 때문이고 발전기에서 기인한 동요를 야기시키는 원인이 전기적 시스템에 더욱 잘 전달되어 상태가 악화됨을 나타낸다.

Table 3에서와 같이 선로 리액턴스가 0.0739로 약한 계통에서는 비선형 동요현상이 심하여 발산한다. 그러나 선로 연결성이 강해지게 되면 오히려 진동이 줄어들게 된다. 이는 앞서 계산한 등가 리액턴스와 같은 맥락으로 설명할 수 있지

Table 1. 직렬보상 수준에 따른 MLE 계산 결과 및 검출시간

직렬 보상 수준(%)	MLE	검출 시간(초)
47.50	0.2718	3.002
50.00	0.4342	1.776
52.50	0.4801	1.294
53.75	0.4560	2.354
55.00	0.3450	1.739
57.50	0.1164	4.805

Table 2. 변압기 리액턴스 감소에 따른 SCR과 MLE 지수

X_{tr}	SCR	MLE	X_{tr}	SCR	MLE
0.12	2.54	0.3450	0.05	3.08	0.5696
0.11	2.60	0.3517	0.04	3.18	0.5949
0.10	2.67	0.4368	0.03	3.29	0.5699
0.09	2.75	0.5044	0.02	3.40	0.5010
0.08	2.82	0.5160	0.01	3.52	0.5695
0.07	2.91	0.5228	0.00	3.65	0.5405
0.06	2.99	0.5201			

Table 3. 선로 리액턴스 감소에 따른 SCR과 MLE 지수

X_{L2}	SCR	MLE	수렴성
0.0739	2.54	+0.3450	Diverge
0.0639	2.54	+0.3389	Diverge
0.0539	2.55	+0.1156	Diverge
0.0439	2.57	-0.2150	Converge
0.0339	2.58	-0.1944	Converge
0.0239	2.60	-0.2466	Converge
0.0139	2.63	-0.3031	Converge
0.0039	2.68	-0.3811	Converge

만, 제안한 방법을 적용한 결과로 설명하자면, 계통이 강건해짐에 따라 간섭의 영향이 약해진다는 것이다.

앞서서 샘플링 주파수를 900 Hz로 Reporting rate를 15로 설정하였다. 그러나 한국 계통에서의 PMU 성능은 실질적으로 300 Hz 이하로 동작한다. Fig. 11은 샘플링 주파수와 MLE의 Step 크기 및 MLE를 비교하여 제안한 방법을 적용하기 알맞은 조건을 찾은 결과이다. 물론 이 결과는 시뮬레이션 시간 10초로 설정했을 때의 결과이며, 더 길게 설정하면 실제 성능의 PMU로도 검출 가능하다. 그림을 보면 480 Hz 이하 report rate 8 이하에서는 비현실적인 MLE 결과가 나오게 되며 축비틀림 모드와 같은 높은 주파수로 나타나는 진동의 검출이 어렵다.

VII. 결론

본 연구는 SSR과 같은 전력 시스템에서 관찰될 수 있는 비선형 동요 현상을 검출하는 방법을 제시했다. 제시한 방법의 계통에 대한 기여는 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째로 비선형 시계열 데이터 분석을 종합적으로 활용했다는 것이다. 측정 기반 계통 해석 분야에 플로케트 상수의 도입은 온라인 비선형 동요 현상의 분석을 가능하게 하였다. 부가적으로 MLE는 단순하게 발산, 수렴이 아닌 진동 영역으로의 응용이 가능함을 밝혀내었다. 둘째로 제시한 방법은 저주파수 진동 뿐만 아니라 SSR, SSTI 및 SSCI와 같은 포괄적인 비선형 동요 현상의 영역에 범용적으로 적용할 수 있는 가능성을 열어준다. 셋째로 기존에 존재하던 디지털 필터 등 오프라인 해석 기반 진동 해석 기술과는 달리 제시한 본 방법을 통하여 연

산 부담이 적은 장점이 있다.

향후 연구로는 PMU를 통하여 실제로 관찰된 사례 및 데이터를 이용하여 진동 검출을 검증하고, 나아가 비선형 동요 현상원을 추적하는 알고리즘을 추가로 개발할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported under the framework of "Development of situation cognition technology with power system big data for power system stable operation" project managed by Korea Electric Power Corporation (No. CX72170123).

한국전력공사의 학술연구용역 시각동기위상측정정보를 활용하는 전력계통 상황인지 응용기술 개발 연구 과제에 의해 지원되었습니다. (No. CX72170123)

REFERENCES

- [1] Dawei Sun, Xiaorong Xie, Yuquan Liu, Ke Wang, Meng Ye, 'Investigation of SSTI between practical MMC based VSC HVDC and adjacent turbogenerators through modal signal injection test', IEEE trans. Power Delivery, 2016, pp.2432-2441.
- [2] Benfeng Gao, Ruixue Zhang, Ren Li, Hongyang Yu, Guoliang Zhao, 'Subsynchronous torsional interaction of wind farms with fsig wind turbines connected to LCC-HVDC lines', Energies, 2017, Vol 10, 9, pp.1435.
- [3] Liang Wang, Jingyu Peng, Yuyang You, Hongwei Ma, 'SSCI performance of DFIG with direct controller', IET Generation, Trans. & Dist., 2017, Vol 11, 10, pp. 2697 - 2702.
- [4] Penghan Li, Jie Wang, Linyun Xiong, Fei Wu, 'Nonlinear controllers based on exact feedback linearization for series-compensated dfig-based wind parks to mitigate sub-synchronous control interaction', Energies., 2017, Vol 10, 8, pp. 1182.
- [5] A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney, J. A. Vastano, 'Determining Lyapunov exponents from a time series', Physica D, 1985, 16, pp. 285-317.
- [6] S. Sato, M. Sano, Y. Sawada, 'Practical methods of measuring the generalized dimension and the largest Lyapunov exponent in high dimensional chaotic systems', Prog.Theor. Phys., 1987, 77, pp. 1-5.
- [7] Michael T. Rosenstein, James J. Collins, Carlo J. De Luca, 'A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets', Phys D Nonlin. Phen., 1993, 65, pp. 117-134.
- [8] Sambarta Dasgupta, Magesh Paramasivam, Umesh Vaidya, Ajarapu Venkataramana, 'PMU-based model-free approach for short term voltage stability monitoring', IEEE Power. Energy. GM., 2012.
- [9] A.M. Harb, M.S. Widyan, 'Modern nonlinear theory as applied to SSR of the IEEE second benchmark model', Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna.
- [10] Kundur, P., 'Power system stability and control', (McGraw-Hill, New York, 1994).
- [11] Rudiger Seydel, 'Practical Bifurcation and Stability Analysis', Springer, New York, 2010).
- [12] Holger Kantz, Thomas Schreiber, 'Nonlinear Time Series Analysis', (Cambridge university press, 2004).
- [13] S.Ruberg, 'MIGRATE-Report on systemic issues', TENNET, 2016.
- [14] IEEE Sub-synchronous resonance working group, 'Second benchmark model for computer simulation of sub-synchronous resonance', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 5, 1985, pp. 1057-1066.
- [15] IEEE Power & Energy Society, 'IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems', IEEE Standards Association.
- [16] Cigre Working group B4.62, 'Connection of wind farms to weak AC networks', 2016.
- [17] NERC Reliability guideline, 'Integrating inverter based resources into weak power systems', 2017.