한국산학기술학회논문지
Vol. 10, No. 8, pp. 1824-1831, 2009

광역 전력계통 주파수 감시망 적용을 위한 광역계통주파수의 전파속도에 관한 연구

국경수[1], 노대석[2*]
[1]미국 전력연구소(EPRI), [2]한국기술교육대학교 정보기술공학부

Study on the Propagation Speed of the wide-area power system frequency for the application of FNET

Kyung Soo Kook[1] and Daeseok Rho[2*]
[1]**Electric Power Research Institute,**
[2]**Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education**

요 약 본 논문은 대규모 전력 송전망에서 발전기가 사고로 인해 순간적으로 전력공급을 중단하게 되었을 때 과도기간 동안 나타나는 전력계통 주파수의 급강하가 탈락된 발전기의 위치로부터 전력 송전망 전체로 파급되어 가는 전파속도를 분석한다. 이러한 전력계통 주파수 동요의 전파속도는 전력계통 고유의 특성에 따라 다르게 나타나기 때문에 광역적 측면에서 전력 수송망의 특성을 이해하는데 중요한 파라미터이며, 최근 미국의 전력 송전망을 대상으로 운영중인 광역 전력계통 주파수 감시스템(FNET)을 활용한 전력 IT 적용연구에서 중요한 파라미터로 활용되고 있다. 본 논문에서는 방대한 규모를 가진 미 동부의 전력송전 연계계통에 대해 최근의 동적모델을 사용하여 다양한 위치에서의 발전기 탈락을 모의한 후 이에 따른 전력계통주파수 동요의 전파 특성을 분석하고 그 전파속도를 제시한다.

Abstract This paper analyzes the propagation speed of the wide-area power system frequency. When a generator supplying the electric power to the grid is accidently tripped due to a disturbance on the systems, power system frequency suddenly drops during the transient period and this propagates from the location of the tripped generator to the other part of the systems like a wave. Since the propagation speed of the power system frequency depends on the own characteristics of power systems, its understanding from the perspective of the wide-area can help us in understanding power systems more correctly. In addition, the propagation speed of the power system frequency is used as a key parameter in the application study of IT based on the internet-based GPS synchronized frequency monitoring network (FENT) which has been recently implemented and operated in U.S. power systems. This paper simulates the generation trip on various locations in U.S. power systems deploying its latest dynamic model and calculates the propagation speed of the power system frequency for the application of FNET.

Key Words : Power Systems, Frequency, Propagation Speed, FNET.

1. 서론

최근 전력계통에 대한 정보통신기술의 적용이 활발히 이루어지면서 인터넷 기반의 광역계통 주파수 감시시스템(Frequency Monitoring Network, FNET)이 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute)와, TVA(Tennessee Valley Authority) 및 버지니아 공대(Virginia Tech.) 전력IT 연구실의 주도로 미국 전력계통에 구축되어 운영되고 있다[1-3].

현재 FNET은 주파수 외란 계측기 (Frequency Disturbance Recorder, FDR)를 사용하여 미국 전역의 40여곳 이상에서 실시간으로 계통 주파수를 측정한 후 이

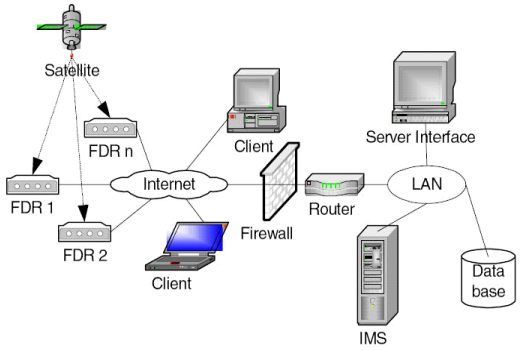
*교신저자 : 노대석(dsrho@kut.ac.kr)
접수일 09년 05월 20일 수정일 (1차 09년 06월 30일, 2차 09년 07월 10일) 게재확정일 09년 08월 19일

를 GPS신호와 동기화하여 인터넷을 통해 중앙 서버로 전송하고 있으며, 설치비용이 저렴하고 구현이 편리하여 전력회사 및 계통운영자들로부터 많은 관심을 받고 있다. 전력계통에 고장이나 사고가 일어났을 때 넓은 지역에 걸친 다양한 위치에서 실제로 측정된 계통 주파수를 분석함으로써 그동안 잘 알려지지 못했던 광역적 측면에서의 계통주파수 특성을 보다 깊이 이해할 수 있을 것으로 기대된다. 전력계통에서 주파수는 전력계통의 1차 목표인 전력수급의 균형을 나타낼 수 있는 중요한 지수로써 발전기들의 출력 제어나 계통 안정화 장치의 제어, 또는 부하차단의 제어를 위한 파라미터로 사용된다. 이러한 계통 주파수는 전력계통이 정상상태에서 전력수급의 균형이 이루어진 상태에는 전력계통의 모든 위치에서 그 값이 정격치(한국이나 미국의 경우 60Hz)로 일정하게 되지만 전력을 공급하던 발전기가 전력 계통으로부터 갑자기 분리(탈락) 되거나 전력을 수송하던 송전선로가 차단되는 등 외란이 발생하게 되면 과도 기간동안 정격 치에서 벗어나 동요하게 된다. 더욱이 발전기 탈락사고 시에 대한 FNET의 실제 계측치를 분석한 결과 이러한 계통 주파수의 동요가 탈락발전기의 위치로부터 나머지 계통으로 전파되어 가는 것이 관찰 되었는데[2,3] 이를 전기 기계적인 파동현상으로 설명하는 연구도 최근소개 되었다[4-6]. 또한, 이러한 계통주파수 동요의 전파현상으로 인해 각 측정위치에서 주파수 동요가 감지되는 시각에 차이가 나타남을 이용하여 역으로 계통주파수 동요를 발생시킨 탈락 발전기의 위치를 예측하는 알고리즘이 제안되었다[3,7]. 다양한 계통연계가 이루어져 운영되고 있는 미국 계통의 경우 계통운영자의 관할지역이 아닌 곳에서 발생한 사고에 의해서도 해당 관할지역의 계통상황이 영향을 받을 수 있기 때문에 이러한 광역적 계통감시에 의한 발전기 탈락위치 예측은 많은 계통 운영자들의 관심을 얻고 있어[8-10] 그 정확도를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다[3]. 반면, 현재의 알고리즘은 계산상의 편의를 위해 계통 주파수의 동요가 발전기 탈락위치로부터 방향에 관계없이 일정한 속도로 전파되어 가는 것으로 가정하고 있기 때문에 계통주파수 동요의 전파속도를 보다 정확히 계산하여 사용하면 알고리즘의 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

이에 대해 본 논문은 미국 전력계통에 대한 최신의 동적모델을 사용하여 다양한 위치에서의 발전기 탈락을 가정한 후 이로 인한 계통주파수 동요의 전파를 모의하여 계통주파수 동요의 전파속도를 계산하여 보고 그 특성을 분석한다. 이를 위해 2장에서는 광역계통 주파수 감시망과 이를 이용한 발전기 탈락위치 예측알고리즘을 간략히 소개하고, 3장에서는 동적 모의해석을 통한 계통주파수 동요의 전파속도 계산방법을 기술하며, 4장에서는 다양한 위치에서의 발전기 탈락에 대한 모의결과를 통해 계통주파수 동요의 전파속도를 계산한다.

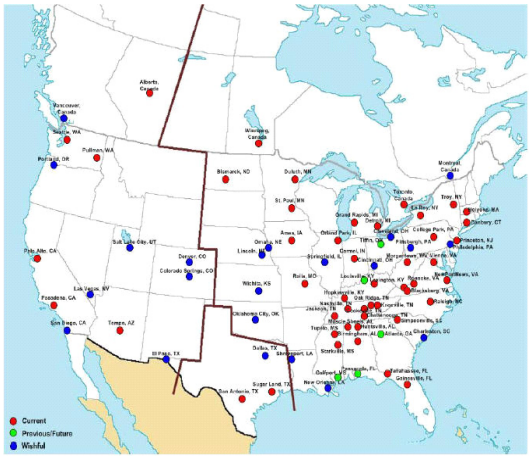
2. FNET을 이용한 발전기탈락위치 예측

광역 전력계통 주파수 감시망은 그림 1과 같이 주파수 외란계측기(FDR)와 중앙처리 서버가 인터넷으로 연결되어 구성된다[2]. 주파수 외란계측기(FDR)는 일반 가정용 전기 콘센트에 연결되어 해당 위치에서의 전력계통 주파수를 측정하며 이를 자체 안테나에서 수신하는 GPS신호와 동기화한 후 인터넷을 통해 중앙서버로 전송하게 된다.



[그림 1] 광역 전력계통 주파수 감시망(FNET)의 구성

전력계통 주파수는 변압기를 통과할 때에도 그 값이 보존되기 때문에 최종 전기 소비자 단계에서 측정된 값과 초고압 전력 송전망에서 측정된 값이 동일하게 된다[2]. 이러한 FNET은 낮은 비용으로 시스템을 구성할 수 있으며 그 정확도 또한 상용화된 위상 측정장치(Phasor Measurement Units PMU)에 버금가는 것으로 확인되었다[2][3]. FNET의 구축에서는 광역계통주파수의 광범위한 반응을 효과적으로 측정해 낼 수 있도록 주파수 외란계측기의 설치위치를 결정하는 것이 중요한데 일반적으로는 주파수 외란계측기들이 균등한 간격으로 전력 송전망 전체에 분포되도록 하는 것이 효과적 일 것이다[3]. 미국 버지니아 공대 전력 IT 연구실에서 운영 중인 FNET에서는 FDR의 개수를 꾸준히 늘려가고 있으며 현재 미 신뢰도 위원회를 구성하는 모든 신뢰도 지역을 포함한 약 40여개 위치에서 계통주파수를 측정하여 분석하고 있다.[3]. 그림 2는 현재 및 향후를 포함한 주파수 외란계측기의 위치를 나타내며 붉은 점은 현재 운영중인 FDR위치를 나타내고 녹색 점은 향후 FDR의 설치위치를, 그리고 파란색 점은 설치 희망위치를 나타낸다[7].



[그림 2] 전력계통 주파수 계측기의 위치(현재 및 향후위치 포함)

또한, FNET에는 서버응용 프로그램과, 데이터베이스 운영서버, 그리고 웹서비스로 구성된 정보관리시스템(Information Management System)도 포함되며 이를 통해 각 FDR에서 측정된 데이터들이 수집되고 저장되며 도식화되거나 가동된다. 그림 3은 FNET에 연계된 웹 서비스를 통해 전력계통 주파수를 실시간으로 제공하는 예를 보여준다[13].

FNET Server Streamer - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

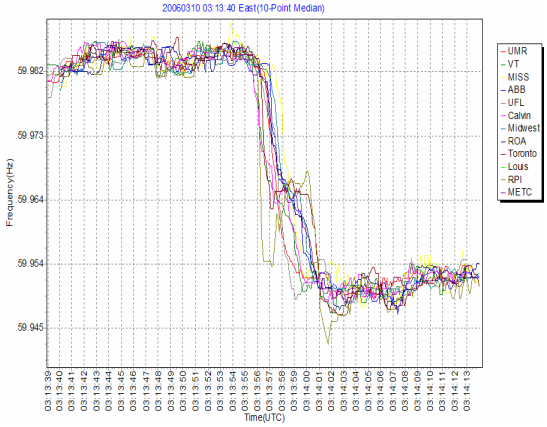
Color Vs Frequency Time Zone:UTC

59.90~59.95	59.95~59.99	59.99~60.01	60.01~60.05	60.05~60.10

NY	60.0057	60.0084	60.0103	60.0127	60.0162
UMR	60.0058	60.009	60.0107	60.0126	60.0161
ARI	60.0061	60.0086	60.0103	60.0123	60.0165
VT	60.0079	60.0112	60.0121	60.0143	60.0176
MISS	60.0061	60.0097	60.0108	60.0131	60.0156
UFL	60.005	60.0091	60.01	60.0119	60.016
Calvin	60.0055	60.008	60.0102	60.0116	60.0154
ABB	60.0056	60.0091	60.0102	60.0126	60.015
Seattle	60.0085	60.0093	60.0088	60.0053	60.004
CA	60.0081	60.0087	60.0089	60.006	60.0038
ASU	60.0093	60.0091	60.0088	60.0067	60.0045
Houston	59.9879	59.9863	59.9912	59.9977	59.9989
UTC Time	09/07/2004 20:33:17	09/07/2004 20:33:22	09/07/2004 20:33:27	09/07/2004 20:33:32	09/07/2004 20:33:37

[그림 3] 광역 전력계통 주파수 감시망을 이용한 실시간 전력계통 주파수 웹서비스

이러한 FNET은 전력송전망의 동적모델 검증이나, 주파수제어용 발전예비력의 산정, 또는 온라인 계통상태해석 등과 같은 다양한 분야에 적용이 기대되고 있는데, 광역계통 주파수 측정치를 이용한 발전기 탈락위치의 예측은 최근 활발히 연구되어 오고 있는 적용 사례 중의 하나이다[7]. 사고로 인해 발전기의 전력공급이 갑자기 중단되는 경우 전력계통 주파수는 과도기간 동안 급강하 하게 되고, 탈락된 발전기로 인한 전력수급의 불균형은 나머지 발전기들의 동기력 계수에 따라 분담되는데 이러한 동기력 계수는 탈락된 발전기와 나머지 발전기들 사이의 전기적 거리에 비례한 관계로 계통주파수의 동요가 탈락 발전기의 위치로 부토 나머지 계통으로 전파되어가는 것으로 나타나게 된다[10,12]. 따라서 계통주파수의 동요가 FDR에서 측정되는 시간이 위치에 따라 달라지는데 이를 역으로 이용하여 FNET 측정치로부터 탈락발전기의 위치를 예측하는 것이다[7,8]. 그림 4는 이러한 계통주파수의 급강하가 여러 위치에 분포된 FDR에서 실제 측정된 예를 나타내며 정상상태에서는 전력송전망의 모든 위치에서에서 동일했던 계통주파수가 과도기간 동안에는 측정위치에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다[11,12].



[그림 4] FNET의 광역계통주파수 측정 예

한편 현재의 FNET을 이용한 발전기 탈락위치 예측 알고리즘은 전력계통주파수의 동요가 그 방향에 관계없이 일정한 속도로 전파되는 것을 가정하고 있으며[7,8], 그 속도는 전력 송전망에서 실제로 확인된 발전기 탈락 사례나 특정 경우의 일회성 모의해석 등을 통해 얻어진 값을 사용하고 있다. 즉, 다음 그림 5와 같이 발전기 탈락이 붉은 사각형으로 표시된 위치(x_e, y_e)에서 발생된 경우, 이로부터 임의의 FDR위치까지의 거리를 다음 식(1), (2)와 같이 간략히 계산할 수 있다.

$$L_i^2 = \alpha^2 (x_i - x_e)^2 + \beta^2 (y_i - y_e)^2 \quad (1)$$

$$L_i = V \times (t_i - t_e) \quad (2)$$

여기서, L_i 는 FDRi와 발전기 탈락위치 사이의 직선거

리, α 와 β 는 각각 위도와 경도의 직선거리 보정계수, x_i와y_i는 각 FDRi 위치의 위도와 경도, V는 전력계통 주파수의 동요의 전파속도, t_e는 발전기 탈락이 일어난 시각, t_i는 FDRi에서 주파수의 동요가 측정된 시각을 나타낸다. 따라서 식(2)를 식(1)에 대입한 후 n개의 FDR에 대한 식끼리 순차적으로 차감하여 정리하면 다음 식(3)을 구할 수 있으며

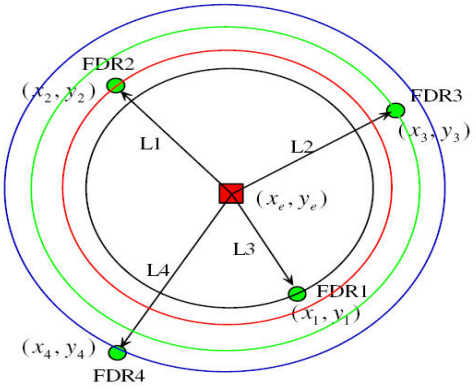
$$C = H \cdot X \tag{3}$$

여기서, $C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}$, $X = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ t_e \end{bmatrix}$

$$C_i = \frac{1}{2}[V^2(t_i^2 - t_{i+1}^2) + \alpha^2 x_{i+1}^2 + \beta^2 y_{i+1}^2 - \alpha^2 x_i^2 - \beta^2 y_i^2]$$

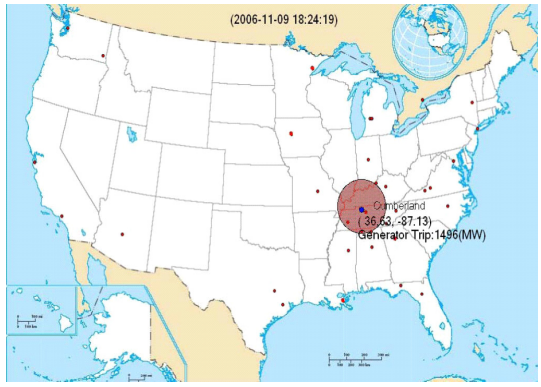
$$H = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1)\alpha^2 & (y_2 - y_1)\beta^2 & V^2(x_1 - x_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_1 - x_n)\alpha^2 & (y_1 - y_n)\beta^2 & V^2(x^n - x_1) \end{bmatrix}$$

이다. 식(3)의 최소자승 해를 구하면 발전기 탈락위치(X)를 계산할 수 있다[7][8].



[그림 5] 주파수 동요의 측정시간의 예

그림 6은 미국 전력송전망에서 2006년 11월에 실제로 일어난 발전기 탈락 시에 FNET에 의해 측정된 주파수를 이용하여 발전기의 탈락위치를 예측한 예를 나타낸다. 그림 6에서 파란색 점으로 표시된 부분이 실제로 발전기가 탈락된 것으로 보고 된 위치이며 붉은색의 큰 원으로 표시된 부분이 주파수 측정치를 이용해 알고리즘이 계산한 탈락 발전기의 위치를 나타낸다. 이러한 발전기탈락 위치 예측의 정확성을 높이기 위해서 FDR의 설치 개수를 더욱 늘리고, 측정 주파수 기반의 발전기 탈락위치 계산알고리즘을 개선하거나 복수의 알고리즘을 적용한 하이브리드 계산 등이 연구되고 있는데 전력계통 주파수 동요의 전파특성을 보다 정확히 반영하여 정확한 전파속도를 사용하는 것도 발전기 탈락 위치 예측의 정확성을 높여줄 것으로 기대되고 있다.



[그림 6] 광역계통주파수 감시를 이용한 발전기 탈락위치의 예측 예

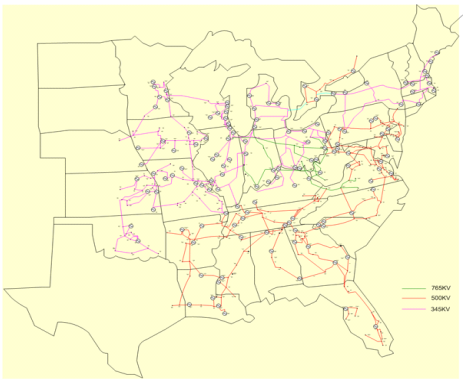
3. 계통 주파수동요 전파속도의 모의 계산

FNET을 이용한 발전기 탈락위치의 예측 알고리즘에서 전력계통 주파수 동요의 전파속도가 이용되는 등 전력계통 주파수 동요의 전파속도에 대한 관심이 증가되고 있으나 실제 측정치를 이용하는 방법에는 제한적인 요소가 많고 이를 위한 데이터베이스 구축에는 많은 시간이 필요하다. 따라서 표 1과 같이 특정 경우에 대해 전력 송전망의 동적 모델을 이용한 모의해석을 통해서 계통주파수의 전파속도를 계산한 사례가 있다.

[표 1] 계통 주파수의 전파속도 계산 예

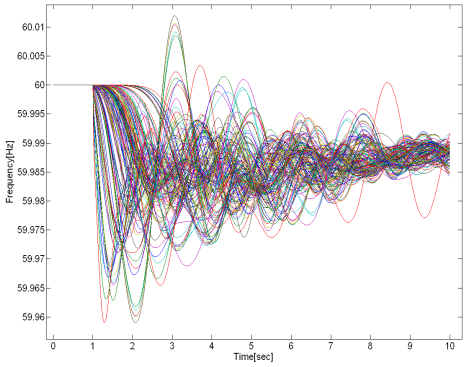
	탈락 발전기의 발전량	탈락 발전기의 위치(주)	계통 주파수 전파속도
미 동부 계통	1,800MW(총 발전량의 0.3%)	플로리다	539[mile/sec]
		뉴욕	460[mile/sec]
		인디애나	550[mile/sec]
미 서부 계통	184MW(총 발전량의 0.3%)	워싱턴	1,144[mile/sec]
		뉴 멕시코	1,144[mile/sec]
		캘리포니아	1,301[mile/sec]

표 1의 사례에서는 미국 전력송전망의 동부 및 서부 계통을 대상으로 임의의 발전기를 탈락시키는 모의해석을 통해 발전기의 탈락위치에서 원거리의 감시모선까지 계통주파수의 동요가 전달되는 속도를 계산한 것으로써 접속되어 있는 발전기의 수가 더 많은 동부 연계계통에서 계통주파수 동요의 전파속도가 더 느리게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만, 표 1에서 계산된 속도는 발전기의 탈락위치에서 멀리 떨어진 단일 지점만을 대상으로 계산된 값이기 때문에 계통주파수의 전파 방향이나 발전기 탈락위치로부터의 거리에 따른 전파속도의 분포 등 계통 주파수 전파속도의 특성을 충분히 보여주지 못하고 있다. 이에 대해 본 장에서는 미 전력 송전망에 대한 최신의 동적 모델을 사용하여 계통 동요주파수의 전파속도에 대한 보다 상세한 모의해석을 통해 다양한 방향과 거리에서의 전파속도를 분석해 본다. 미 동부 연계계통의 동적모델은 약 16,000여개의 모선과 1,626개의 발전기 12,188개의 전기부하 및 27,277개의 송전선로로 구성되어 있으며, 총 발전량은 600GW에 이르는 대규모 전력 계통이다. 또한, 이를 이용한 모의해석에서 계통주파수의 전파속도를 다양한 위치에서 계산하기 위해 계통의 전 지역에 걸쳐 고르게 선택된 148개의 모선에서 전력계통 주파수를 계산하며 여기에는 모든 765kV모선과 전체 500kV 모선의 70%, 그리고 전체 345KV 모선의 30%가 포함되었다. 그림 7은 이러한 전력계통 주파수 감시모선의 위치를 나타낸 것이다. 모의해석에서 발전기 탈락에 의한 계통주파수 동요의 전파속도(V)는 인접한 감시위치 사이의 직선거리(d)와 두 위치에서 계통주파수의 동요가 측정된 시간의 차이(t)를 이용하여 v=d/t 으로 계산된다. 이때 계통주파수 동요의 측정시간은 해당 감시모선에서 계통주파수가 정상상태의 값에서 임계치인 8mHz 이상 변동되는 순간으로 정의하는데 이는 FNET에서 측정기기의 오차나 신호잡음에 의한 오류 등을 감안하여 실제 측정값에 적용하고 있는 임계치를 따른 것이다.



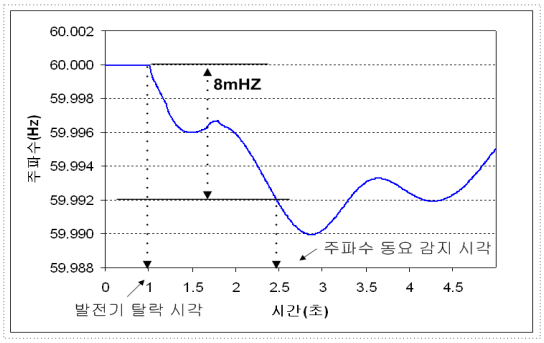
[그림 7] 미 동부 전력계통 모델에서의 주파수 측정위치

이를 바탕으로 다양한 위치에서 발전기 탈락을 모의하고 계통주파수 동요의 전파속도를 다양한 감시모선에서 계산하여 그 특성을 분석한다. 이를 위해 대규모 전력 송전망 해석용 프로그램인 Power System Simulator for Engineering(PSS/E)이 사용되었으며 발전기 탈락에 대한 시간영역에서의 동적모의해석을 실행하고 그 결과를 외부파일로 출력한 후 각 감시모선에서 계통주파수 동요의 전파속도를 분석하였다. 그림 8은 임의의 발전기 탈락 모의해석에 대해 148개의 감시모선에 나타나는 계통주파수의 예를 나타낸다.



[그림 8] 동적모델을 이용한 계통주파수 동요의 모의해석 결과 예

그림 4의 계통주파수 측정치에서와 같이 그림 8의 모의해석 결과에서도 발전기 탈락에 의해 계통주파수가 순간적으로 낮아지는 과도기간 동안 모선의 위치에 따라서 계통주파수가 달라지는 것을 관찰할 수 있으며 모선별로 계통주파수가 임계 값 이하로 떨어지는 시간이 다르게 나타남을 알 수 있다. 따라서 그림 9에서와 같이 각 모의해석결과에서 해당 감시위치의 계통 주파수 값이 8mHz 만큼 하락 되었을 때의 시각을 해당 위치에서의 주파수 동요가 감지된 시각으로 결정하고, 이 시각과 발전기 탈락이 모의되었던 시각과의 차이로부터 계통주파수동요가 발전기 탈락위치로부터 감시위치까지 전파되는데 걸린 시간(t)을 구한 후 별도로 구할 수 있는 발전기 탈락위치와 해당 감시위치와의 거리(d)를 이용하여 해당 감시위치에서의 주파수 동요 전파속도(v=d/t)를 계산한다.



[그림 9] 주파수 동요 전파속도 계산을 위한 주파수 동요 감지시간의 결정

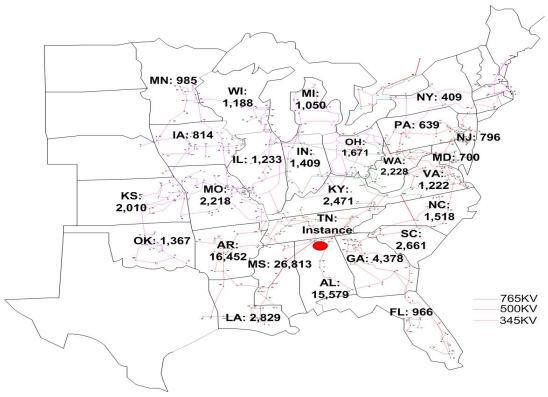
4. 사례연구

본 장에서는 미 동부 연계계통의 서로 다른 다섯 개 지역에서 발전기의 탈락을 모의하여 이에 따른 전력계통 주파수 동요의 전파속도를 계산한다. 표 3은 각 모의해석 사례에서 가정된 탈락 발전기의 해당 위치와 발전량을 요약하였다. 다양한 위치에서 계통 주파수 전파속도를 계산하기 위해 탈락 발전기들은 서로 다른 다섯 개 주에서 선택되었으며 그 위치는 위도와 경도로 표시되었다.

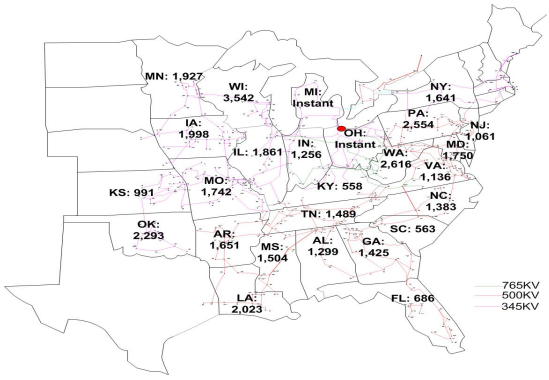
[표 2] 발전기 탈락 모의사례

사례	발전소	NERC 지역	주명	위도	경도	모선 번호	발전량 [MW]
1	Brown s Ferry	SERC	AL	34.50	-86.83	4036	1291
2	Davis Besse	ECAR	OH	41.53	-83.14	21630	2550
3	Waterford	SERC	LA	29.00	-90.49	98583	1075
4	Sherburne	MAPP	MN	45.43	-93.85	61683	2515
5	Surry	SERC	VA	37.14	-76.74	14924	805

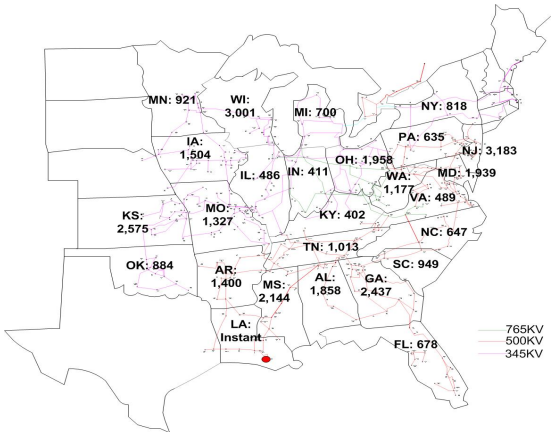
그림 10에서 그림 14는 각 사례에서 계산된 계통주파수 동요의 전파속도를 전력계통도 위에 나타내었다. 그림에서 붉은 점으로 표시된 곳이 탈락 발전기의 위치이며 속도는 [마일/초]의 단위로 표기되었다. 또한, 계통주파수 동요의 전파속도는 각 측정 모선별로 계산된 값을 각 주별 평균값으로 나타내었다. 탈락발전기와 매우 인접한 모선에서는 계통주파수의 동요가 발전기 탈락과 거의 동시에 계측되어 계통주파수 동요의 전파속도가 계산될 수 없었으며 (Instant로 표기) 감시 모선의 위치가 탈락발전기의 위치로부터 멀어질수록 계산되는 계통 주파수 동요의 전파속도가 점차 느리게 나타났다.



[그림 10] 주파수 동요의 전파속도
(탈락발전기: 알라바마주 브라운 페리)

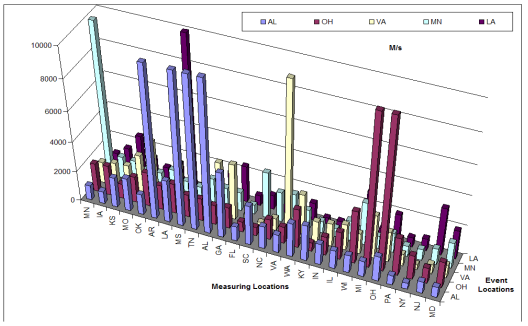


[그림 11] 주파수 동요의 전파속도
(탈락발전기: 오하이오주 데이비드 베쓰)



[그림 12] 주파수 동요의 전파속도
(탈락발전기: 루이지애나주 워터포드)

그림 10 ~ 그림 12에서는 주파수 동요의 전파속도가 발전기 탈락위치 인근에서는 2,000마일/초 이상으로 나타나다가 거리가 멀어지면서 1,000마일/초 이하로 나타나고 있다. 표 3은 이러한 계산결과를 요약하였는데 각 사례별로 구해진 평균값은 1,340마일/초 1,800마일/초의 범위로 계산되었다. 그림 13은 이러한 계산결과를 도식화하여 나타내었는데 X축은 주파수의 계산위치, Y축은 발전기의 탈락위치, 그리고 Z축은 계산된 주파수 동요의 전파속도를 나타낸다.



[그림 13] 계통주파수 전파속도의 계산결과요약

주파수의 전파속도가 발전기 탈락위치로 부터 멀어지면서 점점 줄어들어 400500마일/초까지 감소됨을 알 수 있다.

[표 3] 미 동부 연계계통에서 계통주파수의 전파속도[마일/초] 계산결과

발전기 탈락위치 / 속도 계산위치	AL	OH	VA	MN	LA
MN	985	1927	1433	※	921
IA	814	1998	1610	1455	1504
KS	2010	991	1703	1432	2575
MO	2218	1742	2628	1093	1327
OK	1376	2293	3793	1113	884
AR	※	1651	1286	1559	1400
LA	2829	2023	2855	994	※
MS	※	1504	1424	878	2144
TN	※	1498	1947	1686	1013
AL	※	1299	3622	1289	1858
GA	4378	1425	3739	1251	2437
FL	966	686	545	625	678
SC	2661	563	256	3108	949
NC	1518	1383	819	1999	647
VA	1222	1136	※	2150	489
WA	2288	2616	2983	1309	1177
KY	2417	558	1404	785	402
IN	1409	1256	1526	579	411
IL	1233	1861	1727	1368	486
WI	1188	3542	1385	2873	3001
MI	1050	※	2905	838	700
OH	1671	※	2049	1314	1958
PA	639	2554	784	692	635
NY	409	1641	348	746	818
NJ	796	1061	637	1061	3183
MD	700	1750	875	1750	1939
Average	1,580.8	1,623.25	1,771.32	1,357.88	1,341.44

※ 탈락 발전기의 인근위치는 제외.

5. 결 론

본 논문에서는 FNET 측정치를 이용한 발전기 탈락위치 예측알고리즘에 이용되고 있는 광역계통 주파수 동요의 전파속도를 미국 전력계통의 동적모델을 사용한 방대한 모의해석을 통해 계산하였다. 동적모델의 정확성에도 한계가 있을 수밖에 없겠으나 이러한 모의해석을 통해서 광역계통주파수 동요의 전파특성에 대한 이해를 높이고 이를 바탕으로 보다 정확한 FNET 측정치의 적용연구를 도모할 수 있을 것으로 기대한다. 미국 전력계통에 대한 본 논문의 사례연구를 통해 계통주파수 동요의 전파속도는 탈락발전기의 위치로부터 멀어질수록 급격히 감소하여 탈락 발전기의 인근에서는 약 2,000마일/초 이상, 그 보다 더 먼 지역에서는 약 1,000마일/초 이하로 계산되었다. 따라서 FNET 측정치를 이용한 발전기 탈락위치 예측알고리즘에서도 계통주파수 동요의 전파속도를 FDR의 위치에 관계없이 일정한 값으로 사용하는 것 보다는 탈락발전기와 FDR 위치와의 거리에 따라서 다른 값으로 사용하는 것이 알고리즘의 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 향후 본 논문에서 계산된 계통주파수 동요의 전파속도를 실제 FNET 측정치를 이용한 알고리즘에 적용하여 그 유효성을 검증할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] B. Qiu, L. Chen, V.A. Centeno, X. Dong, Y. Liu: 'Internet Based Frequency Monitoring Network(FNET)', IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Jan.28-Feb.1 2001, Vol. 3. pp. 1166-1171.

[2] Zhian Zhong, Chunchun Xu, Bruce J. Billian, Li Zhang, Shu-Jen Steven Tsai, Richard W. Conners, Virgilio A. Centeno, Arun G. Phadke, Yilu Liu: 'Power System Frequency Monitoring Network (FNET) Implementation', IEEE Trans.Power Systems, 2005, Vol. 20, No.4, pp. 1914-1921.

[3] Yilu Liu: 'A US-wide power systems frequency monitoring network', IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22 2006.

[4] J. S. Thorp, C. E. Seyler, and A. G. Phadke: ' Electromechanical wave propagation in large electric power systems', IEEE Transactions on Circuits & Systems I-Fundamental Theory & Applications, 1998, vol. 45, pp. 614-622.

[5] L. Huang, M. Parashar, A. G. Phadke, and J. S. Thorp:

'Impact of Electromechanical Wave Propagation on Power System Protection and Control', CIGRE conference, 2001.

[6] M. Parashar, J. S. Thorp, and C. E. Seyler: 'Continuum modeling of electromechanical dynamics in large-scale power systems', IEEE Transactions on Circuits & Systems I-Fundamental Theory & Applications, vol. 51, pp. 1848-1858, 2004.

[7] Tao Xia, Hengxu Zhang, Robert Gardner, Jason Bank, Jingyuan Dong, Jian Zuo, Yilu Liu, Lisa Beard, Peter Hirsch, Guorui Zhang, Rick Dong: 'Wide-area Frequency Based Event Location Estimation', IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007

[8] Yilu Liu: 'Wide-area Frequency Based Event Location Estimation' (Final report to EPRI and TVA, Oct. 2006)

[9] Jian Zuo, Mark Baldwin, Hengxu Zhang, Jingyuan Dong, Kyung Soo Kook, Yilu Liu, "Use of Frequency Oscillations to Improve Event Location Estimation in Power Systems", IEEE., Power Engineering Society

[10] Kyung Soo kook: 'Dynamic Model Based Novel Findings in Power System Analysis and Frequency Measurements Verifications', Ph.D. dissertation, Virginia Tech., 2007

[11] Shu-Jen Steven Tsai: 'Study of Global Power System Frequency Behavior Based on Simulations and FNET Measurements', PhD dissertation, Virginia Tech., 2005

[12] Kyung Soo Kook, Yilu Liu, Min Jae Bang, "Study on the Global Behavior of Power System Frequency in Korean Power System for the application of FNET", *IET Generation, Transmission, and Distribution*, Vol. 2, Issue 5, p.764~774, September, 2008

[13] http://www.powerit.vt.edu/, accessed January 2007

국 경 수(Kyung Soo Kook) **[정회원]**

- 1996년 2월: 고려대학교 전기공학과(공학사)
- 1998년 2월: 고려대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2004년 7월: 한국전기연구원 선임연구원
- 2007년 5월: 미국 버지니아 공대 전기공학과(공학박사)
- 2007년 5월~현재: 미국 전력연구소(EPRI) 선임연구원

노 대 석(Dae-Seok Rho) **[정회원]**

- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 고려대학교대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월: 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수

<관심분야>
전력계통, 배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석