

# 저주파 송전 기반 비동기 계통분할 및 안정도 해석에 관한 연구

박태식\*

국립목포대학교 전기공학과 교수

## A study on asynchronous grid division and stability analysis based on low frequency transmission Things Society

Tae-sik Park\*

Professor, Department of Electrical Engineering, Mokpo National University

**요약** 에너지 전환의 가속화로 재생에너지원은 지속적으로 증가하고 있다. 이로 인해 재생에너지원이 특정 지역에 집중되어 발전소와 부하 간에 병목현상이 발생할 수 있으며, 전체 계통의 안정성에 부정적인 영향을 미치게 된다. 병목 현상은 부하에서 전력 부족을 초래하거나 재생에너지 통합을 제한하는 문제를 일으킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 저주파 송전 기술을 제안하며, 계통분할 기법을 활용하여 제안된 저주파 송전 시스템의 설치 위치를 선정한다. 저주파 송전은 약 20Hz 부근의 주파수를 사용하는 전력 전송 기술이다. 저주파 송전 시스템이 설치된 계통을 기반으로 안정도를 평가한다. IEEE 39 bus 시스템을 통해 계통 분할을 수행하고 저주파 송전 시스템이 적용된 계통의 안정도 해석을 수행하였으며, 시뮬레이션은 MATLAB을 통해 진행하였다.

**주제어** : 고유치 해석, 계통분할, 스펙트럴 클러스터링, 안정도 평가, 저주파 송전

**Abstract** Due to the acceleration of energy transition, renewable energy sources are continuously increasing. This may cause renewable energy sources to be concentrated in certain areas, which may create bottlenecks between power plants and loads, and negatively affect the stability of the entire power system. Bottlenecks may cause power shortages in loads or limit the integration of renewable energy. In this paper, we propose a low-frequency transmission technology to solve these problems, and select the installation location of the proposed low-frequency transmission system using the grid partitioning technique. Low-frequency transmission is a power transmission technology that uses a frequency of approximately 20 Hz. We evaluate the stability based on the grid where the low-frequency transmission system is installed. The grid partitioning is performed using the IEEE 39 bus system, and the stability analysis of the grid where the low-frequency transmission system is applied is performed, and the simulation is performed using MATLAB.

**Key Words** : Eigenvalue Analysis, Grid Partitioning, Spectral Clustering, Low-Frequency Transmission

## 1. 서론

최근 에너지 전환의 가속화에 따라 재생에너지원이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 풍력과 태양광 같은 재생에너지원은 특정 지역에 집중되는 경향이 있다. 이와 같은 집중 현상은 발전소와 부하 간 병목현상을 유발하여 전력계통의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 병목현상은 부하 지역에서 전력 부족을 초래할 수 있으며, 재생에너지를 전력계통에 통합하는 데 문제로 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 High Voltage DC (HVDC) 전력전송 기술이 널리 사용 왔다. 이는 대용량 장거리 전력 전송을 가능하게 하여 전력망의 유연성을 향상시킨다. 하지만, HVDC 전력전송 기술은 초기 설치 비용이 높고 기존 AC 전력망과 연계 시 전력변환 손실이 발생하는 단점이 있다[1,2].

저주파 송전 시스템은 전력전송을 위한 다른 해결책으로 High Voltage AC(HVAC)와 HVDC 시스템의 장점이 결합한 기술이다. 주요 장점은 시스템을 표준 주파수보다 낮은 약 20Hz의 주파수로 작동시킴으로써 송전선로의 리액턴스를 줄이고 전력전송 용량을 증가할 수 있다[3,4]. 또한, 저주파 송전은 교류를 사용하기 때문에 기존 AC 전력계통과 연결이 용이하다. 저주파 송전 시스템은 500km 이하의 송전선로 길이를 가진 육상 또는 해상 풍력발전소에서 HVDC 시스템보다 유리하다[5,6].

전력계통은 다양한 발전기 및 부하가 연결되어 작동하는 복잡한 시스템으로 상호작용이 매우 복잡하여 전력계통의 안정성에 큰 영향을 미친다. 이러한 이유로 안정도 분석은 전력계통의 신뢰성과 안정성을 유지하기 위해 필수적이다[7-13]. 따라서, 저주파 송전 기반 시스템을 설치되어도 안정적이고 신뢰할 수 있는 전력 공급을 보장할 수 있는지를 평가하기 위하여 안정도 분석이 필요하다. 저주파수 송전 기반 시스템은 작은 주파수 변동에도 민감하게 반응할 수 있으므로 주파수 안정도를 확보하지 못하면 발전기와 부하 간 동기화가 깨져 전력공급에 심각한 차질이 발생할 수 있다. 전력망의 주요 목적은 안정적이고 신뢰할 수 있는 전력공급이며, 안정도 분석을 통해 잠재적 문제를 사전에 발견하고 이를 해결함으로써 전력계통의 신뢰성을 확보할 수 있다.

이전 연구에서는 주로 저주파 송전 시스템의 전력전송 용량 및 최적 전압 수준, 비용, 전력전송 용량을 고려한 다양한 대안을 제시하였지만, 저주파 송전 시스템의 설치 위치 및 적용된 계통의 안정도 해석을 충분히 고려하

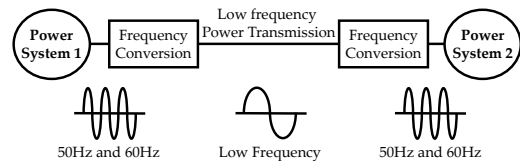
지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 저주파 송전 시스템의 설치 위치를 선정하고, 계통 안정성을 해석하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 스펙트럴 클러스터링 기법을 활용한 계통분할을 통해 저주파 송전 시스템의 설치 위치를 선정하였다. 둘째, 고유치 해석을 통해 저주파 송전 시스템이 적용된 계통의 동적 안정성을 평가하였다. 연구의 타당성을 검증하기 위해 MATLAB을 통해 수행하였으며, IEEE 39 bus system을 활용하였다.

## 2. 저주파 송전 기술

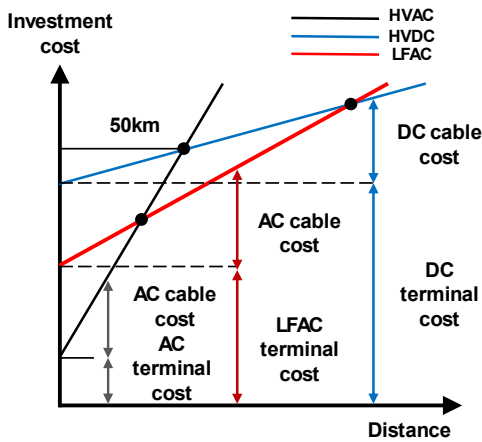
저주파 송전 시스템의 기본 개념도는 Fig. 1로 표현할 수 있으며, 기존의 AC 전력망을 저주파 AC로 연결하는 역할을 한다. 기존 60Hz 및 50Hz 다 낮은 주파수를 사용하는 방법으로 주로 약 20Hz 부근의 주파수를 사용하며, AC 계통 간 연계를 한다. AC 전력전송 시스템에서 선로의 임피던스가 지배적이므로 유효전력 P는 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{V_S V_R}{2\pi f L} \sin\delta \quad (1)$$

여기서,  $V_S$ 와  $V_R$ 는 송전단과 수신단 전압의 크기,  $f$ 는 주파수,  $L$ 은 선로의 인덕턴스,  $\delta$ 는 부하각이다. 수식 (1)에서 유효전력 P를 높이는 방법은 전압의 크기를 높이거나 주파수 및 인덕턴스를 낮추는 것이다. 송전단 및 수신단 전압이 고정된 경우 주파수를 감소시키면 반비례적으로 유효전력을 증가시킬 수 있다. 따라서, 수식 (1)을 통해 저주파 송전 기술이 송전용량을 증가시킬 수 있는 것을 확인하였으며, 전력계통에서 60Hz와 20Hz에서의 송전용량을 수식적으로 비교하면 20Hz에서의 송전용량은 60Hz보다 3배의 송전용량을 갖는다. 또한, Fig. 2와 같이 HVAC 및 HVDC보다 중거리에서 시스템 투자비용의 비교적 낮은 장점을 갖는다[3].



[Fig. 1] Conceptual diagram of a low-frequency transmission system



[Fig. 2] Investment costs of power transmission systems

### 3. 저주파 송전 시스템 위치 선정

#### 3.1 전기적 거리 계산

전기적 거리는 네트워크 내 모선 간 관계를 수치로 표현하는 데 중요한 역할을 한다. 이를 통해 모선 간의 연결 강도를 평가하고, 병목현상이 발생할 가능성이 높은 구간을 사전에 식별할 수 있다.

본 논문에서는 네트워크를 가중치와 비가중치 네트워크로 구분하며, 전기적 거리를 산정하기 위해 전압-무효전력 민감도를 활용한다. 비가중치 네트워크는 단순히 모선 간 연결 여부만을 고려하여 분석이 상대적으로 단순하지만, 계통의 세부적인 전기적 특성을 반영하는 데 한계가 있다. 가중치 네트워크에서는 각 선로의 가중치를 모선 간 전기적 유사성 또는 거리를 나타내며, 이를 기반으로 전압 제어 영역을 나누는 것을 목표로 한다.

전기적 거리는 자코비안 행렬로부터 유도할 수 있으며, 전압과 무효전력 간의 민감도를 통해 계산한다. 자코비안 행렬은 전력계통 내 전압 변화에 따른 전력의 변화를 나타내는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $P$ 와  $Q$ 는 각각 유효전력과 무효전력이며,  $\theta$ 와  $V$ 는 위상각과 전압 크기를 나타낸다.  $J_{22}$ 는 전압과 무효전력 간 민감도를 나타내며, 이를 활용하여  $i$ 번째 모선과  $j$ 번째 모선 간의 전기적 거리를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_{i,j} = \frac{(J_{22})_{i,j} + (J_{22})_{j,i}}{2} \quad (3)$$

송전선로의 임피던스가 작을수록 두 모선 간 전기적 가중치는 더 커지며, 이는 두 모선이 밀접하게 연결되어 있음을 나타낸다. 반대로, 임피던스가 큰 경우 두 모선 간 연결은 밀접하지 않다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 IEEE 39 bus system을 사용하여 모선 간 전기적 거리를 산정하였다. Table 1은 발전기 데이터이며,  $P_G$ 는 발전기 유효전력,  $Q_G$ 는 발전기 무효전력이다. Table 2는 부하 데이터이며,  $P_L$ 은 부하 유효전력,  $Q_L$ 은 부하 무효전력이다.

<Table 1> IEEE 39 bus system generator data

Bus	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (Mvar)	Bus	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (Mvar)
30	250	162	35	650	210
31	520	221	36	560	100
32	650	207	37	540	-1.37
33	632	108	38	830	21.7
34	508	167	39	1000	78.5

<Table 2> IEEE 39 bus system load data

Bus	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (Mvar)	Bus	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (Mvar)
1	97.6	44.2	21	274.0	115.0
3	322.0	2.4	23	247.5	84.6
4	500.0	184.0	24	308.6	-92.2
7	233.8	84.0	25	224.0	47.2
8	522.0	176.6	26	139.0	17.0
9	6.5	-66.6	27	281.0	75.5
12	8.53	88.0	28	206.0	27.6
15	320.0	153.0	29	283.5	26.9
16	329.0	32.3	31	9.2	4.6
18	158.0	30.0	39	1104.0	250.0
20	680.0	103.0			

Table 3는 선로 데이터이며,  $r$ 은 저항,  $x$ 는 리액턴스,  $b$ 는 서셉턴스이다.

<Table 3> IEEE 39 bus system branch data

From	To	$r$	$x$	$b$
1	2	0.0035	0.0411	0.6987
1	39	0.0010	0.0250	0.7500
2	3	0.0013	0.0151	0.2572
2	25	0.0070	0.0086	0.1460
2	30	0.0000	0.0181	0.0000
3	4	0.0004	0.0071	0.6642

3	18	0.0011	0.0133	0.2138
4	5	0.0008	0.0128	0.1342
4	14	0.0008	0.0129	0.1382
5	6	0.0002	0.0026	0.0434
5	8	0.0008	0.0112	0.1476
6	7	0.0006	0.0092	0.1130
6	11	0.0007	0.0082	0.1389
6	31	0.0000	0.0250	0.0000
7	8	0.0004	0.0046	0.0780
8	9	0.0023	0.0363	0.3804
9	39	0.0003	0.0083	3.6000
10	11	0.0004	0.0043	0.0729
10	13	0.0004	0.0043	0.0729
10	32	0.0000	0.0200	0.0000
12	11	0.0016	0.0435	0.0000
12	13	0.0016	0.0435	0.0000
13	14	0.0009	0.0101	0.1723
14	15	0.0006	0.0072	1.0980
15	16	0.0009	0.0094	0.1710
16	17	0.0007	0.0089	0.1342
16	19	0.0016	0.0195	0.3040
16	21	0.0008	0.0135	0.2548
16	24	0.0003	0.0059	0.0680
17	18	0.0002	0.0027	0.3957
17	27	0.0004	0.0058	0.9648
19	20	0.0007	0.0138	0.0000
19	33	0.0007	0.0142	0.0000
20	34	0.0009	0.0180	0.0000
21	22	0.0008	0.0140	0.2565
22	23	0.0006	0.0096	0.1846
22	35	0.0000	0.0143	0.0000
23	24	0.0022	0.0350	0.3610
23	36	0.0005	0.0272	0.0000
25	26	0.0032	0.0323	0.5310
25	37	0.0006	0.0232	0.0000
26	27	0.0014	0.0147	0.2396
26	28	0.0043	0.0474	0.7802
26	29	0.0057	0.0625	1.0290
28	29	0.0014	0.0151	0.2490
29	38	0.0008	0.0156	0.0000

Table 4는 전압 민감도를 기반으로 계산된 모선 간 전기적 거리를 나타내며, 이를 통해 계통 내 각 모선 간 상호작용의 강도를 정량적으로 평가할 수 있다.

<Table 4> Electrical distance between bus

Bus-bus	Electrical distance	Bus-bus	Electrical distance
1-2	2.2370	14-15	3.9052
1-39	1.7099	15-16	10.5872
2-3	6.1105	16-17	9.3774
2-25	63.1136	16-19	4.5170

2-30	2.5000	16-21	4.6583
3-4	2.9555	16-24	9.2128
3-18	6.5669	17-18	11.0252
4-5	4.9133	17-27	4.6383
4-14	4.8669	19-20	3.5983
5-6	29.8290	19-33	6.2514
5-8	6.3653	20-34	4.9842
6-7	7.0995	21-22	5.9826
6-11	10.5562	22-23	7.1177
6-31	6.6867	22-35	6.5000
7-8	18.6908	23-24	3.5124
8-9	1.8011	23-36	5.5797
9-39	1.7084	25-26	3.3809
10-11	22.1207	25-37	5.3967
10-13	22.1542	26-27	7.0132
10-32	6.5000	26-28	2.0947
11-12	0.8513	26-29	1.9152
12-13	0.8526	28-29	6.7071
13-14	8.9889	29-38	8.2671

### 3.2 스펙트럴 클러스터링을 통한 전력계통 분할

전력계통 분할은 시스템 모선 간 전기적 특성과 상호 작용을 고려하여 계통을 여러 그룹으로 나누는 것을 의미한다. 본 논문에서는 스펙트럴 클러스터링을 사용하여 전력계통 분할을 수행한다. 스펙트럴 클러스터링은 원본 샘플 점  $x_i$ 를 새로운 점  $y_i$ 로 변환하여 클러스터링을 수행하는 차원 축소 기술을 사용한다. 이는 고차원 데이터를 클러스터링하는 데 적합하며, 희소 데이터와 방사형 분포 네트워크에서 특히 효과적이다. 스펙트럴 클러스터링은 그래프 이론 기반의 클러스터링 알고리즘으로, 첫 단계는 그래프를 구성하여 데이터 집합의 각 객체를 공간의 정점으로 간주하고 이들 정점을 간선으로 연결한다. 두 점 간의 거리가 멀수록 가중치는 낮아지고, 가까울수록 가중치는 높아진다. 두 번째 단계는 그래프를 특정 규칙에 따라 분할하여 클러스터링을 수행하는 것이다[14,15].

스펙트럴 클러스터링의 유형은 비정규화 스펙트럴 클러스터링과 정규화 스펙트럴 클러스터링으로 나뉜다. 두 가지 유형 간 차이는 라플라시안 행렬이 특정 정도로 정규화되었는지 나뉜다. 본 논문에서는 전력계통에서 요구되는 물리적 상호작용을 반영하기 위해 대칭 라플라시안 행렬 기반 정규화된 스펙트럴 클러스터링을 사용하며, 알고리즘은 Table 5과 같다.

전력계통 분할은 일반적으로 운영자의 경험에 기반하여, 내부 구조적 연결성을 간과하는 경우가 많다. 이를 예방하기 위해 그래프 모델을 기반으로 모선 간 관계를

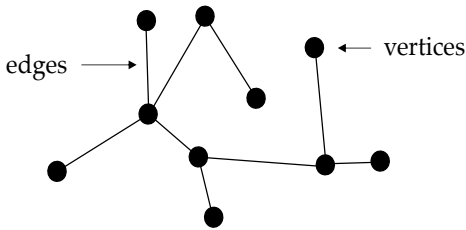
표현하였다. 이러한 접근은 전력계통 내 상호작용의 시각적으로 체계적인 분석을 가능하게 한다. 각 모선은  $v_i$ , 모선 간 전송선은  $e_{ij}$ , 시스템을 무방향 그래프  $G=(V,E)$ 로 단순화 한다.  $V$ 는  $v_i$ 의 집합이며,  $E$ 는 전송선  $e_{ij}$ 의 집합이다. 그래프 인접 행렬  $W$ 와 차수 행렬  $D$ 는 다음과 같이 표현한다. 무방향 그래프에서 인접 행렬은  $w_{ij}=w_{ji}$ 이며, 전력계통의 그래프 이론 개념도를 Fig. 3으로 나타낸다.

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & e_{ij} \in E \\ 0 & e_{ij} \notin E \end{cases} \quad (4)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} \sum_j w_{ij} & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

<Table 5> Spectral Clustering algorithm

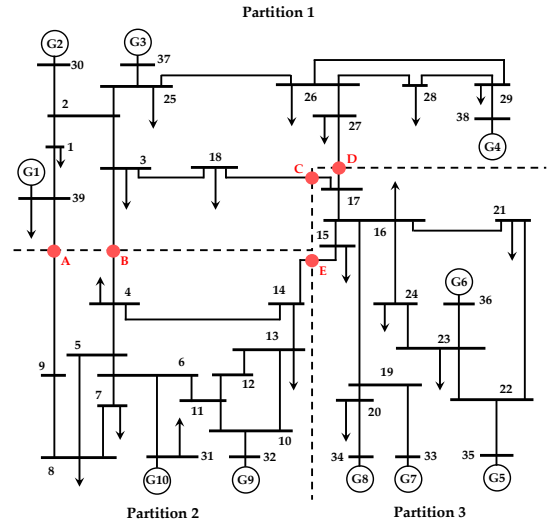
Normalized Spectral Clustering Based on Symmetric Laplacian Matrix
Input : $n$ sample points $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , number of clusters $k$ .
1. Compute the $n \times n$ similarity matrix $S$ .
2. Compute the degree matrix $D$ .
3. Compute the normalized Laplacian matrix $L_{sym}$ as: $L_{sym} = D^{-1/2} L D^{-1/2} (D - S) D^{-1/2}$
4. Compute the eigenvalues of $L_{sym}$ and take the first $k$ eigenvectors of matrix $L_{rw}$ to form the matrix $u_1, u_2, \dots, u_k$ .
5. Construct the matrix $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ , where $U \in R^{n \times k}$ .
6. Let $y_i \in R^k$ denote the $i$ -th row vector of $U$ , for $i = 1, 2, \dots, n$ .
7. $y_i \in R^k$ is normalized such that $\ y_i^*\  = 1$ .
8. Use the k-means algorithm to cluster the new sample points $Y^* = \{y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*\}$ into $C_1, C_2, \dots, C_k$ .
Output : cluster $A_1, A_2, \dots, A_k$ $A_i = \{j \mid y_j \in C_i\}$ .



[Fig. 3] Graph theory concept of power system

전기적 거리를 가중치로 적용한 인접행렬을 모선 간 유사성을 계산할 수 있으며, 이는  $s_{ij} = s(v_i, v_j)$ 로 표현할 수 있다. 계산된 유사성은 유사성 행렬  $S = (s_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$ 로 나타낸다. 본 논문에서는 39개의 모선 데이터를 사용

하여, 39개의 샘플 포인트를 입력값으로 설정하였고, 클러스터 수를 3개로 정의하였다. 이를 기반으로 IEEE 39 bus system을 3개의 지역으로 분할 하였으며, 지역 간을 연결하는 선로를 저주파 송전 시스템의 설치 위치로 선정한다. 전력계통 분할 및 설치 위치는 Fig. 4와 같이 표현하였다.



[Fig. 4] Low frequency transmission system installation location

### 4. 저주파 송전 기반 시스템 안정도 분석

저주파 송전 시스템의 복잡성을 수학적으로 모델링 하기 위해서는 시스템 내 변수들의 시간적 변화를 정확히 표현해야 한다. 저주파 송전 시스템은 비동기 특성을 가지고 있으며 전압, 주파수, 전류 등 여러 상태 변수가 비선형적으로 상호작용한다. 하지만, 비선형을 직접 분석하는 것은 계산 복잡성이 크기 때문에, 작은 교란에 대한 안정도 분석에서는 상태방정식을 선형화하여 시스템의 특성을 평가한다[7-10].

전력 시스템은 작은 외란이 발생할 경우 시간에 따라 변하게 된다. 이러한 변화를 선형화 미분 방정식으로 표현하여, 시스템의 안정도를 평가할 수 있다. 발전기의 정상상태 값을 기준으로 주요 상태 변수를 선형화한다. 상태 변수는  $\delta$ 와  $\omega$ 를 사용한다. 선형화한 방정식은 상태 변수 형태로 통합되어 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\Delta x}{dt} = \tilde{A} \cdot \Delta x + \tilde{B} \cdot \Delta u \quad (6)$$

$$0 = \tilde{C} \cdot \Delta x + \tilde{D} \cdot \Delta u \quad (7)$$

여기서,  $x$ 는 상태 변수,  $u$ 는 제어 변수,  $A$ 는 시스템 행렬,  $B$ 는 제어 행렬,  $C$ 는 출력 행렬,  $D$ 는 출력과 입력 관계를 나타내는 행렬이다.

#### 4.1 동기발전기의 선형화 방정식

먼저, 각 발전기 시스템의 선형화 미분 방정식은 식 (8)로 표현할 수 있으며, 구성요소는 식 (9)로 나타낼 수 있다. 전압 방정식은 식 (10)으로 표현할 수 있으며, 구성요소는 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\Delta x_g}{dt} = \bar{A}_g \Delta x_g + \bar{B}_{I_g} \Delta I_{dqg} + \bar{B}_{V_g} \Delta V_{dqg} \quad (8)$$

$$\bar{A}_g = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s \\ 0 & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix}, \bar{B}_{V_g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\bar{B}_{I_g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{(X_d'' - X_q'')I_{q(0)} - E_d''}{2H} & \frac{(X_d'' - X_q'')I_{d(0)} - E_q''}{2H} \end{bmatrix}$$

$$\Delta V_{dqg} = \bar{P}_g \Delta x_g + \bar{Z}_g \Delta I_{dqg} \quad (10)$$

$$\bar{P}_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{Z}_g = \begin{bmatrix} -R_a & X_q'' \\ -X_q'' & -R_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $V$ 는 동기속도,  $D$ 는 댐핑 계수,  $H$ 는 관성 상수,  $x''$ 는 차과도 리액턴스,  $V_{(0)}$ 는 초기 전압,  $I_{(0)}$ 는 초기 전류,  $R_a$ 는 저항이다.

좌표 변환은 전력 시스템의 각 구성요소의 상태를 동일한 기준 좌표계로 표현하여, 전체 시스템을 효율적으로 분석하고 결합하기 위해 필요하다. 또한, 시간 변화 요소를 제거함으로써 복잡성을 줄일 수 있다. 발전기 전압 방정식에 적용하여 식 (12)로 표현하며, 구성요소는 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_{dqg} = T_{g(0)} \Delta V_g + R_{V_g} \Delta x_g \quad (12)$$

$$\Delta V_g = \begin{bmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \end{bmatrix}, \bar{R}_{V_g} = \begin{bmatrix} V_{q(0)} & 0 \\ -V_{d(0)} & 0 \end{bmatrix}, T_{g(0)} = \begin{bmatrix} \sin\delta_{(0)} & -\cos\delta_{(0)} \\ \cos\delta_{(0)} & \sin\delta_{(0)} \end{bmatrix},$$

$$T_{g(0)}^{-1} = T_{g(0)}^T \quad (13)$$

여기서, 아래 첨자  $x$ 와  $y$ 는 실수부와 허수부이다. 또한, 발전기 전류 방정식에 적용하여 식 (14)로 표현하며, 구성요소는 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta I_{dqg} = T_{g(0)} \Delta I_g + R_{I_g} \Delta x_g \quad (14)$$

$$\Delta I_g = \begin{bmatrix} \Delta I_x \\ \Delta I_y \end{bmatrix}, \bar{R}_{I_g} = \begin{bmatrix} I_{q(0)} & 0 \\ -I_{d(0)} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

위의 수식을 기반으로 발전기의 선형화 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\Delta x_g}{dt} = A_g \Delta x_g + B_g \Delta V_g \quad (16)$$

$$\Delta I_g = C_g \Delta x_g + D_g \Delta V \quad (17)$$

$$A_g = \bar{A}_g + \bar{B}_{I_g} \bar{Z}_g^{-1} (R_{V_g} - \bar{P}_g) + \bar{B}_{V_g} R_{V_g} \quad (18)$$

$$B_g = (\bar{B}_{I_g} \bar{Z}_g^{-1} + \bar{B}_{V_g}) T_{g(0)} \quad (19)$$

$$C_g = T_{g(0)}^T [\bar{Z}_g^{-1} (R_{V_g} - \bar{P}_g) - R_{I_g}] \quad (20)$$

$$D_g = T_{g(0)}^T \bar{Z}_g^{-1} T_{g(0)} \quad (21)$$

#### 4.2 정적 부하의 선형화 방정식

안정도 분석에서 정적 부하 모델을 사용하며, 전압 변화에 따른 부하 전류의 변화를 간략히 나타낸다. 이를 사용하면 부하의 전압 전류 관계의 표현이 용이하며, 시스템의 주요 안정도 분석을 명확히 수행할 수 있다. 부하의 유입되는 전류의 변화는 다음과 같은 모션 전압과 관계를 갖는다.

$$\Delta I_i = Y_i \Delta V_i \quad (22)$$

$$\Delta I_i = \begin{bmatrix} \Delta I_x \\ \Delta I_y \end{bmatrix}, \Delta V_i = \begin{bmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \end{bmatrix}, Y_{ij} = \begin{bmatrix} G_{ij} & B_{ij} \\ -B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서,  $Y$ 는 어드미턴스 행렬,  $G$ 는 컨덕턴스,  $B$ 는 서셉턴스,  $i$  및  $j$ 는 모션의 번호이다.

#### 4.3 네트워크의 선형화 방정식

네트워크 방정식 자체가 선형이라는 점을 감안하여 모션 주입 전류의 편차와 x-y 좌표의 모션 전압 간의 관계에 대한 선형 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \vdots \\ \Delta I_i \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\Delta I_i = \begin{bmatrix} \Delta I_{xi} \\ \Delta I_{yi} \end{bmatrix}, \Delta V_i = \begin{bmatrix} \Delta V_{xi} \\ \Delta V_{yi} \end{bmatrix}, Y_{ij} = \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \quad (25)$$

발전기, 부하, 네트워크 방정식을 기반으로 전체 전력 시스템의 선형화 미분 방정식을 식 (26)과 식 (27) 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\Delta x_G}{dt} = A_G \Delta x_G + B_G \Delta V_G \quad (26)$$

$$\Delta I_G = C_G \Delta x_G + D_G \Delta V_G \quad (27)$$

$$A_G = \text{diag}\{A_{g1} \ A_{g2} \ \dots\}, \ B_G = \text{diag}\{B_{g1} \ B_{g2} \ \dots\}, \quad (28)$$

$$C_G = \text{diag}\{C_{g1} \ C_{g2} \ \dots\}, \ D_G = \text{diag}\{D_{g1} \ D_{g2} \ \dots\}$$

$$\tilde{A} = [A_G], \quad \tilde{B} = [B_G], \quad \tilde{C} = [-C_G],$$

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} Y_{GG} - D_G & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \quad (29)$$

위의 수식을 통해 전력 시스템의 특성을 나타내는 식 (30)을 구하며, 이를 기반으로 고유값을 계산한다.

$$A = A_G - [B_G \ 0] \begin{bmatrix} Y_{GG} - D & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -C_G \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$= A_G + B_G [Y_{GG} - D_G - Y_{GL} Y_{LL}^{-1} Y_{LG}]^{-1} C_G$$

전력계통의 안정도 분석의 순서는 다음과 같다.

- (1) 전력조류 계산을 통하여 각 모선의 전압, 전류, 유효 및 무효 전력을 분석하여 시스템의 현재 상태를 평가.
- (2) 어드미턴스 행렬은 시스템의 모선 간 전기적 관계를 나타내며, 안정도 분석과 모델링의 기초 데이터로 사용.
- (3) 부하의 특성을 기반으로 행렬요소  $G_{ii}$ ,  $B_{ij}$ ,  $B_{ii}$ ,  $G_{ij}$ 를 계산하여 시스템 모델에 부하의 영향을 반영.
- (4) 발전기를 포함한 구성요소의 초기값을 계산하고 선형화 방정식을 통해  $A_G$ ,  $B_G$ ,  $C_G$ ,  $D_G$  행렬을 생성.
- (5) 계산된 행렬을 조합하여 시스템 상태 행렬  $A$ 를 구성하여 전력 시스템의 안정도를 평가.

### 5. 시뮬레이션

본 연구에서는 저주파 송전 기반 비동기 계통에서의 안정성을 평가하기 위해 IEEE 39 bus system을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 MATLAB을 사용하여 전력조류 분석을 진행하였으며, 이를 기반으로 안정도 분석을 수행하였다. 선로 데이터는 Table 2를 사용하며, 저주파 송전선로는 20Hz를 기준으로 계산된다. 기준전력은 100MVA이며, 전력조류 분석은 Table 6으로 나타낸다.

<Table 6> Load flow under normal system operation

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.043	-12.31			90.0	44.2
2	1.054	-9.89				
3	1.039	-12.14			300.0	2.4
4	1.026	-12.36			515.0	184.0
5	1.020	-10.89				
6	1.021	-10.13				
7	1.011	-12.36			240.0	84.0
8	1.011	-12.89			540.0	176.6
9	1.045	-12.74			10.0	-66.6
10	1.030	-7.99				
11	1.026	-8.72				
12	1.014	-8.84			10.0	88.0
13	1.029	-8.79				
14	1.031	-10.69				
15	1.031	-11.08			340.0	153.0
16	1.042	-9.92			360.0	32.3
18	1.045	-11.62			150.0	30.0
19	1.053	-5.13				
20	0.992	-6.60			750.0	103.0
21	1.038	-7.30			310.0	115.0
22	1.052	-2.37				
24	1.046	-9.76			330.0	-92.2
25	1.060	-8.86			220.0	47.2
26	1.060	-9.87			130.0	17.0
27	1.049	-11.49			280.0	75.5
28	1.056	-6.87			200.0	27.6
29	1.054	-4.34			250.0	26.9
30	1.050	-7.68	230.0	130.3		
31	0.982	0.00	674.3	172.1	15.0	4.6
32	0.984	0.15	670.0	154.3		
33	0.997	0.32	660.0	90.8		
34	1.012	-0.77	570.0	165.2		
35	1.049	3.18	728.0	201.5		
36	1.064	5.79	600.0	96.1		
37	1.028	-3.09	460.0	-18.3		
38	41.026	2.01	748.00	-11.63		
39	1.030	-12.60	1000.0	-215.0	1000.0	250.0

부하 어드미턴스는 정적 부하 선형화 방정식을 기반으로 계산하며, 시스템 전력조류 분석 결과로부터 도출된 모선의 전압, 유효 및 무효 전력을 사용하여 계산한다. Table 7을 통하여 나타낸다.

〈Table 7〉 Load admittance

Bus	Admittance	Bus	Admittance
1	0.83 - 0.41i	21	2.88 - 1.07i
3	2.78 - 0.02i	23	2.37 - 0.77i
4	4.89 - 1.75i	24	3.02 + 0.84i
7	2.35 - 0.82i	25	1.96 - 0.42i
8	5.29 - 1.73i	26	1.16 - 0.15i
9	0.09 + 0.61i	27	2.54 - 0.69i
12	0.10 - 0.86i	28	1.79 - 0.25i
15	3.20 - 1.44i	29	2.25 - 0.24i
16	3.32 - 0.30i	31	0.16 - 0.05i
18	1.37 - 0.27i	39	9.43 - 2.36i
20	7.62 - 1.05i		

〈Table 8〉 YGG admittance matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
2	1	-55.25	12	11	-69.93
1	2	55.25	11	12	69.93
3	3	0.16	13	13	0.68
4	3	-40.05	14	13	-36.75
3	4	40.05	13	14	36.75
4	4	0.16	14	14	0.68
6	5	-50.00	15	15	1.11
5	6	50.00	16	15	-43.07
7	7	3.46	15	16	43.07
8	7	-70.25	16	16	1.11
7	8	70.25	17	17	3.28
8	8	3.46	18	17	-63.93
9	9	2.77	17	18	63.93
10	9	-55.42	18	18	3.28
9	10	55.42	19	19	15.82
10	10	2.77	20	19	-159.93

〈Table 9〉 YGL admittance matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
19	1	-1.60	9	39	-2.75
20	1	39.94	10	39	54.92
19	2	-39.94	9	40	-54.92
20	2	-1.60	10	40	-2.75
2	3	53.90	12	43	68.22
1	4	-53.90	11	44	-68.22
4	11	37.38	13	45	-0.68
3	12	-37.38	14	45	36.75
19	17	-4.79	13	46	-36.75
20	17	119.81	14	46	-0.68
19	18	-119.81	15	49	-1.09
20	18	-4.79	16	49	42.02
6	19	46.73	15	50	-42.02
5	20	-46.73	16	50	-1.09
7	37	-3.24	17	57	-3.20
8	37	65.66	18	57	62.38
7	38	-65.66	17	58	-62.38
8	38	-3.24	18	58	-3.20

〈Table 10〉 YLL admittance matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
1	1	4.48	7	8	296.65
2	1	-63.77	8	8	23.11
3	1	-2.06	9	8	-77.82
4	1	24.16	10	8	-4.86
1	2	63.77	27	8	-77.22
2	2	4.48	28	8	-4.79
3	2	-24.16	7	9	-4.86
4	2	-2.06	8	9	77.82
1	3	-2.06	9	9	40.62
2	3	24.16	10	9	-548.84
3	3	64.65	11	9	-29.41
4	3	-211.87	12	9	382.35
5	3	-5.66	15	9	-6.35
6	3	65.74	16	9	88.83
49	3	-56.93	7	10	-77.82
50	3	69.94	8	10	-4.86
1	4	-24.16	9	10	548.84
2	4	-2.06	10	10	40.62
3	4	211.87	11	10	-382.35
4	4	64.65	12	10	-29.41
5	4	-65.74	15	10	-88.83
6	4	-5.66	16	10	-6.35
49	4	-69.94	9	11	-29.41
50	4	-56.93	10	11	382.35
3	5	-5.66	11	11	46.81
4	5	65.74	12	11	-646.45
5	5	23.18	13	11	-7.06
6	5	-280.19	14	11	108.24
7	5	-8.56	21	11	-10.34
8	5	140.32	22	11	121.07
35	5	-6.18	9	12	-382.35
36	5	74.68	10	12	-29.41
3	6	-65.74	11	12	646.45
4	6	-5.66	12	12	46.81
5	6	280.19	13	12	-108.24
6	6	23.18	14	12	-7.06
7	6	-140.32	21	12	-121.07
8	6	-8.56	22	12	-10.34
35	6	-74.68	11	13	-7.06
36	6	-6.18	12	13	108.24
5	7	-8.56	13	13	28.17
6	7	140.32	14	13	-324.72
7	7	23.11	15	13	-18.76
8	7	-296.65	16	13	215.76
9	7	-4.86	11	14	-108.24
10	7	77.82	12	14	-7.06
27	7	-4.79	13	14	324.72
28	7	77.22	14	14	28.17
5	8	-140.32	15	14	-215.76
6	8	-8.56	16	14	-18.76

시스템의 어드미턴스 행렬은 네트워크 선형화 방정식을 기반으로 도출되며, 부하 어드미턴스를 적용하여  $G_{ii}$ .

$B_{ij}$ ,  $B_{ji}$ ,  $G_{ij}$ 을 구한다. 이를 통하여  $Y_{GG}$ ,  $Y_{GL}$ ,  $Y_{LG}$ ,  $Y_{LL}$ 을 Table 8-10에 나타낸다.

〈Table 11〉 YLG admittance matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
4	1	53.90	45	14	-36.75
3	2	-53.90	46	14	-0.68
12	3	37.38	49	15	-1.09
11	4	-37.38	50	15	42.02
20	5	46.73	49	16	-42.02
19	6	-46.73	50	16	-1.09
37	7	-3.24	57	17	-3.20
38	7	65.66	58	17	62.38
37	8	-65.66	57	18	-62.38
38	8	-3.24	58	18	-3.20
39	9	-2.75	1	19	-1.60
40	9	54.92	2	19	39.94
39	10	-54.92	17	19	-4.79
40	10	-2.75	18	19	119.81
44	11	68.22	1	20	-39.94
43	12	-68.22	2	20	-1.60
45	13	-0.68	17	20	-119.81
46	13	36.75	18	20	-4.79

〈Table 12〉 IEEE 39 bus system generator data

Gen	$H$	$D$	$R_u$	$x''_d$	$x''_q$
1	3.10	5.56	0	0.04	0.04
2	4.20	4.00	0	0.03	0.03
3	2.43	9.00	0	0.05	0.05
4	3.45	14.00	0	0.05	0.05
5	3.48	10.00	0	0.04	0.04
6	2.64	8.00	0	0.04	0.04
7	2.86	3.00	0	0.04	0.04
8	2.60	3.00	0	0.05	0.05
9	3.58	10.00	0	0.05	0.05
10	3.03	9.75	0	0.05	0.05

위에서 도출한 어드미턴스 행렬은 각 모선 간의 상호 작용을 나타낸다. 대각 모선은 자기 어드미턴스를 기반으로 구하며, 비대각 요소는 상호 어드미턴스를 기반으로 구한다. 이를 통해 계통 내 전류와 전압의 관계를 분석할 수 있다.

1번부터 10번까지 발전기 파라미터는 Table 12에 나타난 관성상수  $H$ , 댐핑계수  $D$ , 저항  $R_a$ , 차과도 리액턴스  $x''$ 를 사용하였으며, 이를 기반으로 10개 발전기의 초기 변수값을 도출하였다. 초기 전압  $V(0)$ , 초기 전류  $I(0)$ , 초기 각도  $\delta(0)$ , 초기 차과도 전압  $E''(0)$ 는 각각 발전기의 정상 상태를 나타내며, Table 13에 나타낸다.

〈Table 13〉 Generator initial variable value

Gen	$\delta(0)$	$V_q(0)$	$V_d(0)$	$I_q(0)$	$I_d(0)$	$E''_q(0)$	$E''_d(0)$
1	4.25	1.03	0.22	2.11	-1.37	0.97	0.13
2	52.68	0.60	0.78	5.56	4.40	0.82	0.50
3	50.11	0.63	0.75	5.56	4.23	0.82	0.50
4	58.37	0.53	0.85	4.22	5.18	0.79	0.64
5	44.62	0.71	0.72	5.19	2.72	0.81	0.54
6	51.04	0.70	0.78	5.61	4.51	0.88	0.55
7	56.92	0.67	0.83	3.39	4.60	0.85	0.69
8	48.96	0.63	0.81	2.99	3.34	0.78	0.68
9	58.12	0.57	0.85	3.53	6.38	0.86	0.69
10	24.50	0.82	0.62	9.07	4.04	0.92	0.39

도출된 초기 변수값은 상태 방정식을 기반으로  $A_G$ ,  $B_G$ ,  $C_G$ ,  $D_G$  행렬을 생성하며, 이를 Table 14-17로 나타낸다. 생성된 행렬을 기반으로 고유값을 구하고 이를 기존 송전 기반 시스템의 고유값과 비교하였으며, Table 18로 나타낸다.

〈Table 14〉 AG matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
2	1	-4.14	12	11	-3.78
1	2	376.99	11	12	376.99
2	2	-0.90	12	12	-1.44
4	3	-2.91	14	13	-5.41
3	4	376.99	13	14	376.99
4	4	-1.61	14	14	-1.52
6	5	-2.80	16	15	-4.76
5	6	376.99	15	16	376.99
6	6	-1.40	16	16	-1.85
8	7	-3.66	18	17	-3.49
7	8	376.99	17	18	376.99
8	8	-0.58	18	18	-2.03
10	9	-4.80	20	19	-4.78
9	10	376.99	19	20	376.99
10	10	-1.75	20	20	-0.48

〈Table 15〉 BG matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
2	1	0.24	12	11	-1.22
2	2	3.95	12	12	3.54
4	3	-1.14	14	13	-1.59
4	4	2.96	14	14	4.95
6	5	-0.96	16	15	-0.67
6	6	2.84	16	16	4.68
8	7	-1.29	18	17	-1.17
8	8	3.67	18	18	3.36
10	9	-0.91	20	19	-0.11
10	10	4.76	20	20	4.78

<Table 16> CG matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
1	1	24.49	11	11	24.66
2	1	-1.50	12	11	8.49
3	3	17.89	13	13	26.12
4	3	6.87	14	13	8.39
5	5	20.32	15	15	22.74
6	5	6.87	16	15	3.25
7	7	19.07	17	17	23.17
8	7	6.73	18	17	8.08
9	9	27.21	19	19	40.13
10	9	5.22	20	19	0.94

<Table 17> DG matrix

Row	Col	Value	Row	Col	Value
2	1	25.00	12	11	25.00
1	2	-25.00	11	12	-25.00
4	3	20.00	12	12	0.00
3	4	-20.00	14	13	25.00
5	5	0.00	13	14	-25.00
6	5	22.22	16	15	22.22
5	6	-22.22	15	16	-22.22
6	6	0.00	17	17	0.00
8	7	20.00	18	17	22.22
7	8	-20.00	17	18	-22.22
10	9	28.57	18	18	0.00
9	10	-28.57	20	19	40.00
11	11	0.00	19	20	-40.00

<Table 18> Power system stability analysis with low frequency transmission system installed

Mode	Eigenvalue	
	High voltage ac transmission system	low frequency ac transmission system
$\lambda_1, \lambda_2$	$-0.72 \pm 11.31i$	$-0.70 \pm 09.29i$
$\lambda_3, \lambda_4$	$-0.70 \pm 32.63i$	$-0.70 \pm 32.69i$
$\lambda_5, \lambda_6$	$-0.74 \pm 32.09i$	$-0.49 \pm 29.85i$
$\lambda_7, \lambda_8$	$-0.58 \pm 31.66i$	$-0.74 \pm 32.16i$
$\lambda_9, \lambda_{10}$	$-0.47 \pm 29.57i$	$-0.57 \pm 31.76i$
$\lambda_{11}, \lambda_{12}$	$-0.92 \pm 21.26i$	$-0.94 \pm 21.84i$
$\lambda_{13}, \lambda_{14}$	$-0.69 \pm 22.49i$	$-0.67 \pm 23.25i$
$\lambda_{15}, \lambda_{16}$	$-0.69 \pm 25.68i$	$-0.62 \pm 26.46i$
$\lambda_{17}, \lambda_{18}$	$-0.59 \pm 26.13i$	$-0.68 \pm 25.84i$
$\lambda_{19}, \lambda_{20}$	$-0.66 \pm 26.07i$	$-0.66 \pm 26.07i$

## 6. 결론

본 논문은 저주파 송전 기술을 기반으로 한 비동기 계통 분할 및 안정도 해석을 수행하였다. 전력계통 분할을 수행하기 위해 전압 민감도를 통한 전기적 거리를 도출하여 스펙트럴 클러스터링에 적용하였으며, IEEE 39

bus system을 3개의 지역으로 분할 하였다. 이를 기반으로 저주파 송전 시스템의 위치를 선정하였다. 또한, 저주파 송전 시스템이 적용된 전체 전력계통의 안정도를 분석하기 위해 발전기, 부하, 선로의 선형화 모델을 기반으로 상태 방정식을 수립하였으며, 고유값 분석을 통하여 저주파 송전 기반 시스템의 안정도를 평가하였다. 안정도 분석 결과 저주파 송전 기반 시스템이 적용된 계통은 안정적인 범위 내에서 계통의 신뢰성을 유지할 수 있음을 확인하였다.

따라서, 본 논문에서는 증가하는 재생에너지로 인한 병목현상을 해소하기 위해 계통분할 및 저주파 송전 기반 시스템을 설치하였으며, 안정도 분석을 통하여 저주파 송전 기반 시스템이 적용된 계통의 안정성을 확인하였다.

## REFERENCES

- [1] Mohammadi, F., "Power Management and Protection in MT-HVDC Systems with the Integration of High-Voltage Charging Stations," Ph.D. Thesis, University of Windsor, Windsor, Canada, 2019.
- [2] Weixing Lin and D. Jovic, "High reliability Multiport Multiphase DC hub," 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, USA, pp. 1-8, 2013.
- [3] Ngo, T. A., "Low Frequency AC Transmission for Power Systems," Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, USA, 2017.
- [4] D. Sehloff, "Low Frequency AC Transmission Upgrades With Optimal Frequency Selection," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 2, pp. 1437-1448, March 2022.
- [5] N. Qin, S. You, Z. Xu and V. Akhmatov, "Offshore wind farm connection with low frequency AC transmission technology," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, Canada, pp. 1-8, 2009.
- [6] Meng, Y., "Comparative Economic Analysis of Low Frequency AC Transmission System for the Integration of Large Offshore Wind Farms," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021.
- [7] Kundur, P., "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, 2009.
- [8] Wang, X., "Modern Power Systems Analysis," Springer, 2008.
- [9] H. Wang, "A Review of Power System Transient Stability Analysis and Assessment," 2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao), Qingdao, China, pp. 1-6, 2019.

- [10] Y. C. Su, "Power System Dynamic Stability Analysis and Stability Type Discrimination," Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, Newcastle upon Tyne, UK, pp. 516-520, 2006.
- [11] L. Li, "Small Signal Stability Analysis and Optimize Control of Large-Scale Wind Power Collection System," in IEEE Access, vol. 10, pp. 28842-28852, 2022.
- [12] S. B. Barot, "Small Signal Stability Analysis of DFIG Penetrated Multi-machine Power System with Synthetic Inertia Control," 2018 20th National Power Systems Conference (NPSC), Tiruchirappalli, India, 2018.
- [13] S. Wang, "Small-signal Dynamic Modeling and Stability Analysis of Integrated Systems with Photovoltaic and Hydropower Stations," 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (isPEC), Beijing, China, pp. 2425-2430, 2019.
- [14] Y. Yang, "Fast Power Grid Partition for Voltage Control With Balanced-Depth-Based Community Detection Algorithm," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 2, pp. 1612-1622, 2022.
- [15] H. Gu, "Partitioning Active Distribution Networks by Using Spectral Clustering," 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (isPEC), Chengdu, China, pp. 510-515, 2020.

**박 태 식(Tae-Sik Park)**

**[정회원]**



- 2000년 8월 : 고려대학교 대학원  
전기공학과 (공학박사)
- 2000년 9월 ~ 2005년 8월 :  
삼성종합기술원 책임연구원
- 2005년 9월 ~ 2013년 8월 :  
특허청 행정관 (대전, 대한민국)

- 2013년 9월 ~ 현재 : 목포대학교 전기공학과 교수

〈관심분야〉

자산관리, 전력전자, 전력계통