

# 전력계통에서 동조 현상

論文  
55A-4-5

## A Sync Phenomenon in Power Systems

沈冠植\* · 南海鍾†  
(Kwan-Shik Shim · Hae-Kon Nam)

**Abstract** - This paper presents a definition of sync phenomenon occurring in power systems, and describes the characteristics of sync in basic electric circuits. In addition, sync observed in basic circuits was extended to the analysis of dynamic characteristics in power systems. This paper, moreover, describes the sync occurring among system outputs from time domain simulation for two-area systems. In power systems, sync is a common phenomenon that is always observed among generator powers or bus voltages. Thus, we can use sync to obtain the characteristics of power systems without being bound to a specific operating point. Sync can be useful information in power system operation and planning.

**Key Words** : Sync, Signal, Oscillation, Mode, Power System

### 1. 서 론

동조는 두 가지 사건이 일정기간 이상 지속해서 동시에 일어나는 현상으로 문헌 [1]에서 반딧불이 무리의 동조, 행성궤도의 패턴, 심장박동이나 양자들의 동조 등 생물과 무생물에서 일어나는 다양한 동조현상에 대해서 기술하고 있다. 동조는 자기 조직화(self organization) 능력과 동시성으로 특징되는 저절로 나타나는 질서[2]를 의미하고 복잡한 자연계 속에 내포되어 있는 현상이다.

발전기와 다양한 전력기기들로 구성된 전력계통에서 각종 기기들은 동일한 주파수로 동기 되어 운전된다. 동기 된 계통에서 발전기들은 그 정격에 따라서 전력을 배분하거나 설정 값에 따라서 부하에 전력을 공급한다. 전력계통에서 발전기와 부하들은 네트워크를 통하여 상호 병렬 연결되어 있고 부하변동과 같은 외란에 대해서 자기조절 특성으로 동기 되어 안정 운전된다. 만일 한 발전기가 동기속도를 이탈하여 운전하면 이때 발생하는 전력 변화는 계통의 다른 발전기들에 전달된다. 동시에 각 발전기의 회전자 속도가 변화하고 터빈, 여자기등과 같은 제어기들의 적절한 제어 동작으로 계통은 동기속도로 운전된다.

대부분 발전기에는 전기적인 진동을 감쇠시키기 위하여 제동권선이 삽입되어 있으며 발전기 회전속도를 일정하게 유지하기 위하여 자동적으로 터빈을 조절하는 조속기 계통을 가지고 있다. 그리고 발전기 단자 전압을 일정하게 유지

하기 위한 전압제어 시스템을 가지고 있다. 이와 같은 제어기는 소비자에게 양질의 전력을 공급하고 안정하게 계통을 운용하기 위해서 필수적인 기기들이다. 그러나 부적당한 설정이나 네트워크 상태에 따라서 진동을 유발할 수 있다. 특히 과도안정도 향상을 위하여 계통의 고장에 따른 동기화력 상실을 방지하기 위하여 사용되고 있는 고속여자시스템은 계통진동의 재동을 약화시키는 경향이 있다[3-4].

이 논문에서는 계통에서 발생하는 진동이 서로 동조되는 현상에 대해서 기술하고 있다. 먼저 전력계통에서 발생하는 진동들이 서로 합해지는 양의 동조와 서로 상쇄되는 음의 동조 및 준 동조로 나누어서 동조(sync)를 정의하였다. 그리고 직렬회로와 병렬회로의 전압과 전류사이에 일어나는 동조 현상을 규명하였다. 또한 직병렬회로의 동조현상을 확장하여 다기 전력계통에서 발생하는 동조 현상을 해석하는데 적용하였다.

이 논문의 제 2장에서는 동조를 정의하고 제 3장에서는 기본 전기회로에서의 동조특성을 규명하였다. 그리고 제 4장에서는 전력계통의 동조현상을 기술하였고 제 5장에서는 두 지역계통에 대한 시간영역 시뮬레이션을 통해 전력계통에서 발전기 출력들 사이에 발생하는 동조현상을 규명하였다.

### 2. 동조의 정의

전력계통에서 동기(synchronization)라는 개념은 매우 중요한 요소이다. 계통에 포함된 모든 기기들은 일정한 주파수에서 동작하고 있기 때문에 동기발전기는 항상 일정한 주파수로 운전해야 하는, 즉 각 발전기들이 서로 동기 상태를 유지해야 한다. 전력계통에서 동기는 발전기를 비롯한 전체 계통에 포함된 모든 전력기기들이 서로 동일한 주파수에서 운전/동작되는 것을 의미한다. 이 논문에서는 지금까지 계통에서

\* 교신저자, 正會員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
E-mail : hknam@chonnam.ac.kr

\* 正會員 : 全南大 工業技術研究所 先任研究員 · 工博  
接受日字 : 2006年 1月 24日  
最終完了 : 2006年 3月 14日

널리 사용된 동기라는 용어와 구분하기 위해서 동조(sync)라는 용어를 사용한다. 개념적 측면에서 동기는 주파수 크기에 중요성이 있으나 동조는 주파수뿐만 아니라 신호의 위상도 중요한 요소로 고려 한다. 그러므로 전력계통에서 동기는 상용주파수 60Hz가 주요 관심 주파수인 반면 동조는 위상을 고려할 수 있는 2Hz 이하의 저주파수가 주요 관심 주파수가 될 수 있다.

동적시스템에서 동조가 발생할 수 있는 조건은 스스로 진동을 발생할 수 있는 많은 수의 진동자들로 구성되어 있어야 하고, 각각의 진동들의 크기가 동일해서 위상이 시스템의 특성을 지배할 수 있게 서로 연결되어 있어야 한다[1].

임의의 동적시스템에서 외란에 따른 진동과 이를 억제하기 위한 제어 동작은 필수적이다. 제동토크가 작아서 지속적으로 진동하는 시스템에서 동일한 특성을 가진 변수에 대해서 동조를 정의한다. 다변수 시스템에서 동일한 특성을 가진 신호들이 비슷한 주파수를 가지고 진동할 때, 그 신호들의 위상이 같거나 반대일 때 신호들은 서로 동조하고 있다. 예를 들어 아래 그림과 같이 두 신호가 발생되는 임의의 시스템이 있다고 하자. 동일한 특성의 두 신호  $y_1$ ,  $y_2$ 가 동시에 발생하고 동일한 크기와 주파수를 가지면 동조는 정의될 수 있다.

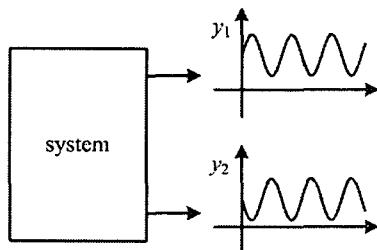


그림 1 출력 신호  
Fig. 1 Output signal

그림 2에는 신호를 정현파로 가정하고 두 신호와 페이저를 나타내었다. 만일 동일한 시간에서 두 신호의 크기가 같고 위상차가 180°인 경우, 그림 2(a)와 같이 두 신호는 서로 반대로 진동하여 합은 상쇄된다. 그리고 위상차가 0°인 경우, 그림 2(b)와 같이 두 신호는 중첩되어 합은 더욱 큰 신호가 된다. 따라서 신호들 사이에 위상차가 180°인 경우를 음의 동조(negative sync, -sync)라 하고 위상차가 0°인 경우를 양의 동조(positive sync, +sync)라 정의한다. 또한 그림 2(c)와 같이 두 신호가 위에서 정의한 +sync나 -sync가 아닌 경우를 준 동조(quasi sync, Qsync)라 정의한다. 실제 시스템에서 대부분의 신호들의 크기와 위상이 정확하게 일치하지 않으므로 모든 동조는 Qsync가 되지만 이 논문에서는 신호의 위상차가 180° 근처일 때는 -sync, 위상차가 0°근처일 때는 +sync로 취급한다.

시스템 해석에서 시스템의 안정/불안정은 신호의 제동계수에 따라서 결정된다. 그러나 다변수 시스템에서 한 변수의 제동특성은 전체시스템의 안정도를 좌우하는 절대적 척도는 아니다. 이 논문에서 기술한 동조는 안정도를 판단하는 제동계수와 같은 지표는 아니나 신호들 사이에 연관성으로부터 제동계수와 함께 전체 시스템의 안정도를 판단하는

지표가 될 수 있다.

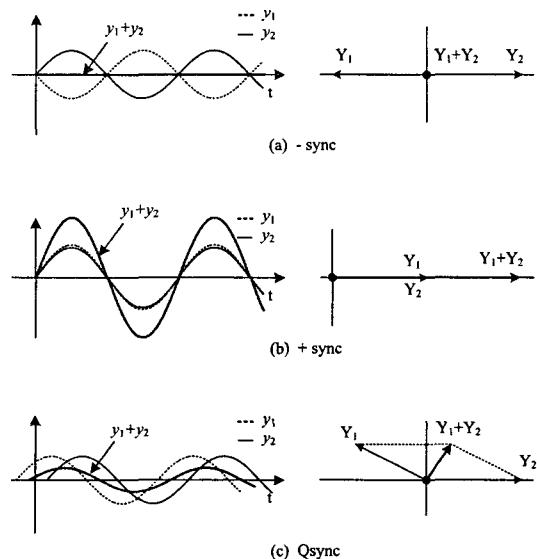


그림 2 신호의 동조  
Fig. 2 Sync of signal

### 3. 기본 회로와 동조

그림 3에는 전압원이 2개인 간단한 직렬회로와 병렬회로를 나타내었다. 각 회로에서 전원은 부하  $Z_L$ 에 전력을 공급하고 있다. 각 회로에서 부하의 소비전력을 일정하게 하는 두 전원 전압의 위상차와 부하전류 사이에 어떤 관계가 있는가를 파악하기 위하여 전압원의 위상에 크게 영향을 받지 않고 부하에 일정전력을 공급하는 전류원을 나타내었다. 그러므로 그림 3에서 전류원에 의한 전류  $I_0$ 가 전압원에 의한 전류  $I_1$ ,  $I_2$ 보다 월씬 큰 값으로 가정한다.

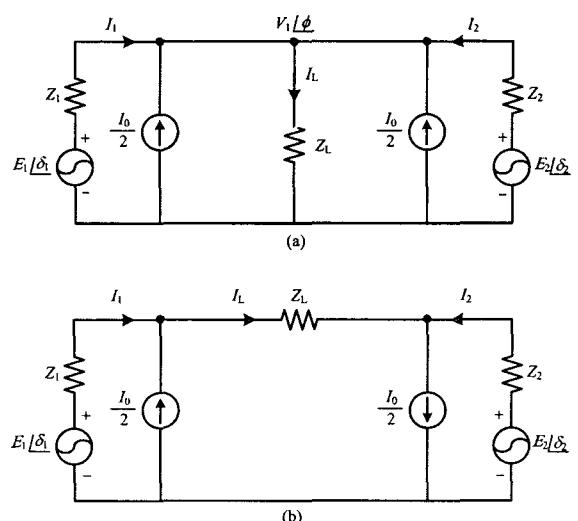


그림 3 직렬회로와 병렬회로  
Fig. 3 Serial and parallel circuits

### 3.1 병렬회로와 동조

그림 3(a) 병렬회로에서 부하모션 전압의 위상각  $\phi = 0$ 이고, 전류원에 의한 전류  $I_0 = 0[A]$ 라 하면, 부하전류는 다음과 같이 전압원의 위상각의 함수로 나타낼 수 있다.

$$f(\delta_1, \delta_2) = f_1(\delta_1) + f_2(\delta_2) \quad (1)$$

$$f_1(\delta_1) = \frac{Z_2 E_1 \angle \delta_1}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_L + Z_L Z_1} = A \angle \delta_1, \quad (2)$$

$$f_2(\delta_2) = \frac{Z_1 E_2 \angle \delta_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_L + Z_L Z_1} = B \angle \delta_2 \quad (3)$$

전압원의 위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 의 변화에 대해서 부하전류  $I_L$ 이 일정하기 위한 조건은 부하전류를 각 위상각에 대해서 편미분하면 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial \delta_1} + \frac{\partial f}{\partial \delta_2} = 0 \quad (4)$$

그러므로 이 식을 만족하기 위해서는 다음 식이 성립해야 한다.

$$A \cos \delta_1 = -B \cos \delta_2 \quad (5)$$

$$A \sin \delta_1 = -B \sin \delta_2 \quad (6)$$

이 식에서  $A$ 와  $B$  상호관계에 따라서 위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$  사이에 관계가 다르게 된다. 전압원의 크기가 같고 임피던스  $Z_1, Z_2$ 가 같을 때,  $A/B \cong 1$ 이 되고, 위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$  사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$\delta_1 = \delta_2 + \pi \quad (7)$$

이와 같은 조건에서 병렬회로에 흐르는 부하전류  $I_L = 0$ 이므로 흐르지 않는다. 만일 그림 3에서 부하와 병렬로 연결된 전류원에 의한 전류가 흐를 때, 부하전류  $I_L = I_0$ 가 되고 부하전류의 변화는 0이 된다. 만일 두 전압원의 위상차가 발생하면 부하전류는  $I_0$ 를 중심으로 진동하게 되고, 위상차가  $0^\circ$ 에서 부하전류는 최대로 진동하게 된다. 이때 두 전압원의 위상은 같고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_1 = \delta_2 \quad (8)$$

그림 3(a) 병렬회로의 전압-전류 관계를 벡터도로 나타내면 그림 4와 같다. 벡터도에서 전압  $E_1, E_2$ 의 위상차가  $180^\circ$ 일 때, 전압원에 의한 부하전류는 흐르지 않고 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 의 위상차도  $180^\circ$ 가 된다. 반대로 전압  $E_1, E_2$ 의 위상차가  $0^\circ$ 에 근접하면, 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 의 위상차도  $0^\circ$ 에 근접하여, 전압원에 의한 부하전류는 최대가 된다.

병렬회로에서는 전압  $E_1, E_2$ 가  $+sync$ 일 때, 전류  $I_1, I_2$ 가  $+sync$ 가 되고, 부하전류는 최대로 진동하게 된다. 반대로

전압  $E_1, E_2$ 가  $-sync$ 일 때, 전류  $I_1, I_2$ 가  $-sync$ 가 되고, 전압원의 위상차가  $\delta_1 = \delta_2 + \pi$ 일 때, 전압원에 의한 부하전류는 0이 된다. 전압원의 위상차가 점점 커지면 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 의 위상차도 커지므로 부하전류 변화는 점점 작아진다.

결과적으로 병렬회로에서 부하전류가 커질수록 전압  $E_1, E_2$ 의 위상차는 작아져서 전압은  $+sync$ 로 동조하고, 반대로 부하전류가 작아질수록 전압  $E_1, E_2$ 의 위상차는 커져 전압은  $-sync$ 로 동조한다.

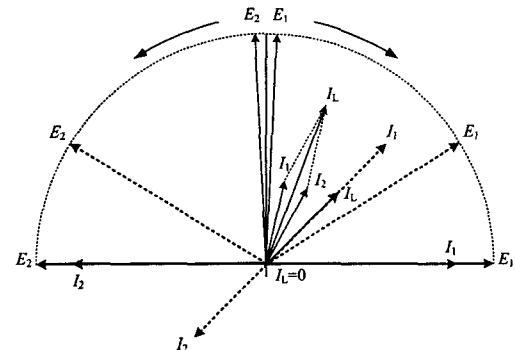


그림 4 병렬회로의 벡터도

Fig. 4 Phase diagram of parallel circuit

### 3.2. 직렬회로와 동조

그림 3(b)에 나타난 직렬회로에서 부하모션에 공급하는 부하전류는 병렬회로와 마찬가지로 전류원에 의한 전류  $I_0 = 0[A]$ 라 하면, 다음과 같이 전압원의 위상각의 함수로 나타낼 수 있다.

$$f(\delta_1, \delta_2) = f_1(\delta_1) + f_2(\delta_2) \quad (9)$$

$$f_1(\delta_1) = \frac{E_1 \angle \delta_1}{Z_1 + Z_2 + Z_L} = A \angle \delta_1, \quad (10)$$

$$f_2(\delta_2) = -\frac{E_2 \angle \delta_2}{Z_1 + Z_2 + Z_L} = -B \angle \delta_2 \quad (11)$$

위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 가 변화할 때, 부하전류가 일정하게 흐르기 위한 조건은 병렬회로에서와 같이 전류를 각 위상각에 대해서 편미분하면 얻을 수 있다.

$$A \cos \delta_1 = B \cos \delta_2 \quad (12)$$

$$A \sin \delta_1 = B \sin \delta_2 \quad (13)$$

만일 계수  $A \cong B$ 라 하면, 전압원의 위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$  사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$\delta_1 = \delta_2 \quad (14)$$

이와 같이 직렬회로에서는 두 전압원의 위상각이 같을 때, 즉 전압원이  $+sync$ 이면, 부하전류가 흐르지 않는다. 병렬회로에서와 같이 전류원에 의한 전류가 흐를 때, 부하전류

$I_L = I_0$  가 되고 이때 부하전류는 변화하지 않고 일정한 전류가 흐른다. 두 전압원의 위상차가 발생하면 부하전류는  $I_0$ 를 중심으로 진동하게 되고, 위상차가  $180^\circ$ 에서 부하전류 변동은 최대가 된다. 이때 두 전압원의 위상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_1 = \delta_2 + \pi \quad (15)$$

그림 3(b)의 직렬회로의 전압-전류 관계를 벡터도로 나타내면 그림 5와 같다. 전압원에 의한 부하전류가 흐르지 않기 위해서 전압  $E_1, E_2$ 의 위상차는  $0^\circ$ 에 근접해야 하고, 최대 부하전류가 흐르기 위해서 전압의 위상차는  $180^\circ$ 에 근접해야 한다.

결과적으로 직렬회로에서는 전압  $E_1, E_2$ 가  $+sync$ 이면, 전압원에 의한 부하전류는 최소가 되고, 전압  $E_1, E_2$ 가  $-sync$ 이면, 부하전류는 최대가 된다. 그러므로 직렬회로에서 전압원에 의한 최대 부하전류가 흐를 때, 전압은  $-sync$ 로 동조하고, 부하전류가 흐르지 않을 때, 전압은  $+sync$ 로 동조한다.

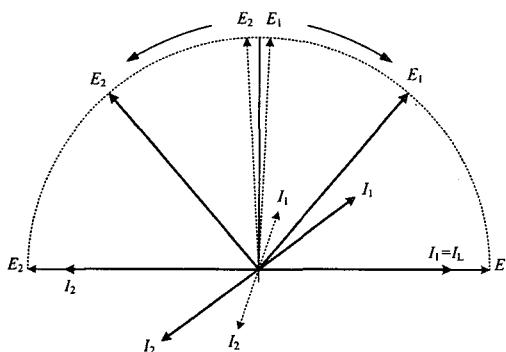


그림 5 직렬회로의 벡터도

Fig. 5 Phase diagram of parallel circuit

지금까지의 결과를 요약하면, 부하에 일정전류를 공급(전압원에 의한 부하전류 최소)하기 위해서 병렬회로에서는 두 전압원의 크기가 같고 위상차가  $180^\circ$ 가 되어야 하고, 직렬회로에서는 위상이 동상이어야 한다. 즉 병렬회로에서 전원 전압은 부하전류가 작을 때,  $-sync$ 로 동조하며, 부하전류가 클 때,  $+sync$ 로 동조한다. 직렬회로에서는 병렬회로와 반대로 부하전류가 클 때,  $-sync$ 로 동조하며, 부하전류가 작을 때, 두 전압은  $+sync$ 로 동조한다. 지금까지 기술한 병렬회로와 직렬회로에서 동조를 요약하면 표 1과 같다.

표 3 기본회로에서 동조

Table 3 Sync of basic circuit

circuit	voltage	current
parallel	$+sync$	maximum
	$-sync$	minimum
serial	$-sync$	maximum
	$+sync$	minimum

#### 4. 전력계통에서 동조

전력계통은 많은 발전기와 제어기, 다양한 형태의 부하들이 송전선을 통하여 서로 연결되어 있다. 선로고장과 같은 외란에 대해서 주파수 변동과 전력 불평형이 발생한다. 이와 같은 불평형 상태에서 계통은 발전기와 여자기, 터빈/조속기의 동적상태에 종속되어 새로운 동작점에서 운전된다. 따라서 전력계통에서의 동조 현상은 발전기나 제어기의 동적특성과 밀접하게 관련되어 있다. 그러나 외란 발생 후, 초기과도상태에서는 발전기를 비롯한 제어기들이 새로운 동작점에 수렴하기 위한 동적상태로 동작하므로 동시성과 반복성이 나타나지 않는다. 예를 들어 계통이 대용량의 발전력을 상실하였을 때, 초기에 모든 발전기 주파수는 동시에 빠르게 감소하여 부하차단이나 새로운 예비전원을 투입해야 계통주파수를 정상적으로 유지할 수 있다. 이때 주파수는 동시에 변화하므로 주파수 동태에 대해서 동시성은 부여되나 반복적으로 이루어지는 현상이 아니므로 동조현상이라 할 수 없다. 그러므로 전력계통에서 동조는 정상상태에서 발생하는 진동과 같이 주기적 동시성을 나타내는 동적현상이 관심이다. 이 논문에서는 제어기의 영향이 이미 발전기 출력이나 전압에 포함된 상태라 가정하고 주기적인 동시성을 가지는 진동에 대해서만 고찰한다.

먼저 각 발전기들의 동태를 나타내는 동요방정식은 다음과 같다.

$$M_i \ddot{\delta}_i + D_i \dot{\delta}_i + P_{\alpha} = P_{Mi} \quad (16)$$

이 식은 전기적 출력과 기계적 출력 그리고 전력 위상각 사이에 관계를 나타내는 식으로 부하전력과 관련된 변수를 추가하여 선형화 하면, 다음과 같은 미소 변위에 대한 동요방정식을 얻을 수 있다[4].

$$M_i \Delta \ddot{\delta}_i + \tilde{D}_i \Delta \dot{\delta}_i + \Delta P_i = \Delta P_{Mi} - \Delta P_{Li} \quad (17)$$

여기에서  $\Delta P_{Mi}$ 와  $\Delta P_{Li}$ 는 기계적 출력의 변화와 부하의 변화를 의미하고  $M_i$ 는 발전기의 관성모멘트이며  $\tilde{D}_i = D_i + D_{Mi}$ 로 발전기와 주파수에 종속적인 부하의 영향이 포함된 제동계수이다.

식 (17)의 동요방정식을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 6과 같다. 그림 6에서  $K_{Pi}$ 는 제동계수의 역수로 각 발전기의 제동계수  $\tilde{D}_i$ 가 작으면, 위상각은 지속적으로 진동하게 된다.

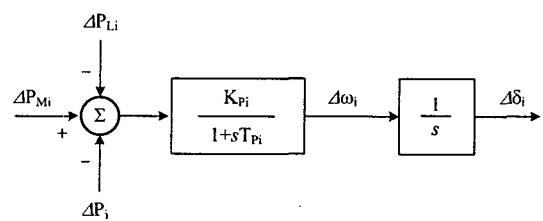


그림 6 발전기 블록다이어그램

Fig. 6 Generator block diagram

각 모선에 전력은 송전선을 통하여 연결된 모선전압으로 표현될 수 있는데,  $i$ -번째 모선에서 네트워크에 주입한 전력을  $P_i$ 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k b_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) \quad (18)$$

여기에서  $\delta_i, \delta_k$ 는  $i$ -번째 모선과  $k$ -번째 모선의 전압 위상각이다. 이 식을 선형화 하면,  $i$ -번째 모선의 전력 변화  $\Delta P_i$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P_i = \sum_{k=1}^n T_{ik} (\Delta\delta_i - \Delta\delta_k) \quad (19)$$

$$T_{ik} = V_i V_k b_{ik} \cos(\delta_i^0 - \delta_k^0) \quad (20)$$

여기에서  $T_{ik}$ 는 동기화토크 계수(synchronizing torque coefficient)로  $T_{ik}$ 가 클수록 동일한 위상 변화에 대해서 전력도 더 크게 변화한다. 동기화토크 계수는 초기위상차  $\delta_i^0 - \delta_k^0$ 가 작을수록 선로 서셉턴스  $b_{ik}$ 가 클수록 동일한 위상 변화에 대해서 전력의 변화는 더 크다.

모선  $i$ 에 모선  $j$ 와 모선  $k$ 가 연결되어 있고, 모선  $i$ 의 위상각  $\delta_i^0 = 0$ 이고 모선  $j$ 와 모선  $k$ 의 전압의 크기와 각 선로의 서셉턴스가 같다고 가정하자. 이때 모선  $j$ 와 모선  $k$ 의 위상각이 같으면 동기화 토크 계수  $T_{ij} = T_{ik}$ 가 성립한다. 동기화 토크 계수가 같으므로 모선  $j$ 와 모선  $k$ 의 동일한 위상변화는 모선  $i$ 의 전력변화에 동일하게 기여하고 있고 이것은 모선  $j$ 와 모선  $k$ 의 전압이 강하게 동조되어 있다고 생각할 수 있다. 그러므로 동기화토크 계수는 한 모선에 연결된 다른 모선들 사이에 동조 되어 있는 정도를 나타낸다.

#### 4.1 전력계통에서 동조

전력계통에서 동조 현상을 해석하기 위하여 아래 그림과 같은 간단한 계통을 도입한다. 그림 7은 2기 1모선 계통으로 각 발전기는 부하에 각각  $P_1$ 과  $P_2$ 의 전력을 송전하고 있다.

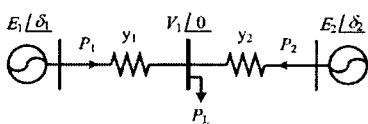


그림 7 단순한 2기 계통

Fig. 7 Simple 2 machine system

그림에서 발전기 모선전압  $\tilde{E}_1 = E_1 \angle \delta_1$ ,  $\tilde{E}_2 = E_2 \angle \delta_2$ 이고, 부하모선의 전압을  $\tilde{V} = V \angle 0$ 라 하면, 발전기 모선에서 송전하는 유효전력은 선로저항을 무시하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$P_1 = VE_1 b_1 \sin \delta_1 \quad (21)$$

$$P_2 = VE_2 b_2 \sin \delta_2 \quad (22)$$

그러므로 유효전력의 변화는,

$$\Delta P_1 = VE_1 b_1 \cos \delta_1^0 \Delta \delta_1 = T_1 \Delta \delta_1, \quad (23)$$

$$\Delta P_2 = VE_2 b_2 \cos \delta_2^0 \Delta \delta_2 = T_2 \Delta \delta_2 \quad (24)$$

또한 선로저항을 무시하고, 부하에서 소비한 전력의 유효성분은 다음과 같다.

$$P_L = P_1 + P_2 = V(E_1 b_1 \sin \delta_1 + E_2 b_2 \sin \delta_2) \quad (25)$$

그러므로 각 발전기 출력의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta P_1 = \Delta P_L - T_2 \Delta \delta_2 \quad (26)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_L - T_1 \Delta \delta_1 \quad (27)$$

식 (25)에서 부하전력의 최대값은 위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 가 같을 때( $\delta_1 = \delta_2$ ) 발생한다. 이것은 병렬회로에서 최대 부하전류가 흐르기 위한 전원전압의 위상각 조건인 식 (8)과 같다. 이때 발전기 단자전압의 크기와 선로 서셉턴스가 같으면, 동기화토크 계수  $T_1 \cong T_2$ 가 되고, 각 발전기 출력 변화  $\Delta P_1 \cong \Delta P_2$ 가 된다. 동기화토크 계수가 같으므로 부하모선을 중심으로 두 발전기 모선이 +sync로 동조되어 있다. 이것은 두 발전기의 단자전압의 위상이 같을 때, 발전기 출력의 변화도 같다는 것을 의미한다. 이때는 단자전압 위상차가 0에 근접한 경우이므로 출력  $P_1$ 과  $P_2$ 는 +sync로 동조된다.

만일 위상각  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 의 위상차가 180°인 경우, 부하전력은 0이 되는데, 이것은 병렬회로에서 부하전류가 작은 경우인 식 (7)과 같다. 이때 단자전압의 크기와 선로 서셉턴스가 같으면 동기화토크 계수  $T_1 \cong -T_2$ 가 되고, 전력 변화는  $\Delta P_1 = -\Delta P_2$ 가 된다. 동기화토크 계수가 반대이므로 부하모선을 중심으로 두 발전기 모선이 -sync로 동조되어 있다. 따라서 부하전력이 작은 경우, 발전기 출력  $P_1$ 과  $P_2$ 는 -sync로 동조된다.

제 3장 병렬회로에서 전압과 부하전류 사이에 동조 현상을 기술하였다. 전력계통에서도 부하전력이 클 때, 병렬 연결된 발전기 출력들은 서로 +sync로 동조하고, 부하전력이 작을 때, 발전기 출력들은 서로 -sync로 동조한다.

앞에서 기술한 것과 같이 전력계통에서 발생하는 진동은 계통의 상태나 제어기의 제어동작에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 지금까지 기술한 발전기 출력과 단자전압도 터빈/조속기나 여자기의 동작에 따라서 다르나 이 논문에서는 이를 제어기의 영향이 포함된 발전기출력이나 전압이 동조된 진동에 대해서만 고찰하였다.

#### 4.2 다기계통에서 동조

대규모 동적 시스템에서 동조는 전체적이고 동시적인 현상이다. 즉 계통이 분리되거나 전기적으로 약하게 연결되어 있는 경우를 제외하고 동조는 전체 계통에서 하나의 형태로 동시에 발생한다. 전력계통은 발전전력이 부하전력에 일치

하도록 운전한다. 그러나 부하가 항상 변동하므로 발전기 출력도 항상 변화한다. 이와 같이 전력제어에 의해 전력을 부하에 공급하기 위하여 발전기들끼리 서로 출력을 조절하는 과정에서 시작된 진동은 제동특성이 취약한 계통에서는 지속된다. 그리고 동일한 특성의 신호들 사이에 진동이 동조되는 현상이 발생한다.

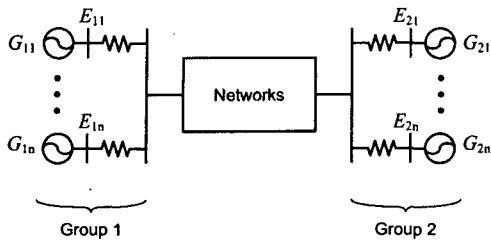


그림 8 다기 전력 계통  
Fig. 8 Multimachine power systems

다기계통에서는 각 지역발전기에서 동조와 전체 계통에서의 동조가 동시에 이루어진다. 만일 특정 발전기 그룹이 전기적으로 분리되어 운전되거나 약하게 연결되어 있으면, 전체 계통의 동조에 참여하지 않는다. 그림 8은 다수의 발전기가 동일모선에 연결되어 하나의 발전기 그룹을 형성하고 있고, 이를 그룹은 네트워크를 통하여 서로 연결되어 있는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 계통에서 동조는 그룹 내부의 발전기들 사이에 동조와 그룹과 그룹 사이에 동조가 동시에 발생한다.

먼저 그룹 1에서 발전기 출력과 발전기 단자전압의 동조는 부하 조건에 따라서 결정된다. 정상적으로 병렬 운전 중인 계통에서 하나의 모선에 연결된 발전기들의 출력보다 전체 계통 부하가 크다. 즉, 한 모선에 연결된 발전기 출력의 합을  $P_G$ 라 하고, 계통 전체 부하를  $P_L$ 이라 하면, 다음 식이 성립한다.

$$P_L \gg P_G \quad (28)$$

그러므로 모선에 연결된 발전기들에서 네트워크로 큰 부하전류가 흐르는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 그림 4의 병렬회로 베틀도에서 큰 부하전류가 흐를 때, 발전기 단자전압  $E_1, E_2$ 의 위상차가 작아지므로 서로 +sync로 동조되고 따라서 전력  $P_1, P_2$ 도 서로 +sync로 동조된다. 그러므로 정상 운전 중인 계통에서 동일 모선에 연결된 발전기 그룹의 신호들은 항상 +sync로 동조된다. 이와 같은 관계는 발전기 그룹 2에서도 동일하게 성립한다. 그러므로 대규모 네트워크를 통하여 연결된 동일모선의 발전기들은 정상적인 상태에서 각각 서로 +sync로 동조되어 운전된다. 만일 계통의 전체 부하가 한 모선의 발전기들의 정격출력 보다 작은 경부하일 경우, 작은 부하전류가 흐르므로 발전기들 출력들 사이에는 서로 -sync로 동조되어 운전된다.

그림 8에서 그룹 1과 그룹 2는 송전선로와 다양한 부하모선을 포함하고 있는 복잡한 네트워크를 통하여 서로 연결되어 있다. 따라서 부하가 포함된 네트워크를 하나의 부하모선으로 가정하고 T-형 등가회로나 π-형 등가회로로 나타

낸 병렬회로로 취급할 수 있다. 그러므로 선로를 통하여 연결된 두 모선사이에 동조는 단순 병렬회로에서의 동조 현상으로 취급할 수 있고, 두 그룹 사이에는 표 1에 나타나있는 병렬회로의 동조특성을 가지고 발전기 그룹끼리 동조한다.

## 5. 전력계통에 적용

전력계통의 동조현상을 검증하기 위해서 그림 9에 나타나 있는 두 지역계통[3]에 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 이 계통은 두 지역이 연계선로로 연결되어 있는 대칭구조로 비록 규모는 작지만 동기기를 비롯한 기기 모델이 실제 계통과 유사하고 진동의 특성을 잘 반영하고 있다. 병렬 연계선로로 연결된 2개의 지역은 지역 내에 각각 2개의 발전기를 가지고 있다.

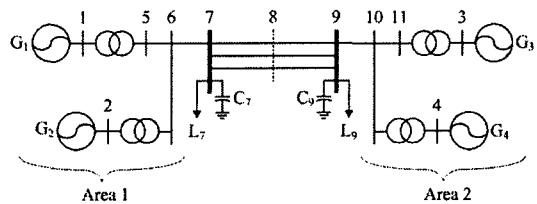


그림 9 Two-area 계통  
Fig. 9 Two-area system

이 계통에서 두 지역의 부하 조건을 2가지 경우로 나누어서 동조 현상을 확인하였다. 각 지역에 부하가 균등하여 연계선로에 조류를 작게 흐르게 한 경우(Case 1)와 지역 2에 부하량이 발전량보다 커서 지역 1에서 지역 2로 조류를 많이 흐르게 한 경우(Case 2)로 구분하였다. 각 경우에 부하와 발전량은 다음과 같다.

Case 1 : 선로 조류가 작은 경우

area 1,  $P_L=1367\text{MW}$ ,  $Q_L=100\text{MVar}$ ,  $Q_C=200\text{MVar}$

area 2,  $P_L=1367\text{MW}$ ,  $Q_L=100\text{MVar}$ ,  $Q_C=350\text{MVar}$

Case 2 : 선로 조류가 큰 경우

area 1,  $P_L=967\text{MW}$ ,  $Q_L=100\text{MVar}$ ,  $Q_C=200\text{MVar}$

area 2,  $P_L=1767\text{MW}$ ,  $Q_L=100\text{MVar}$ ,  $Q_C=350\text{MVar}$

문헌 [3]에는 이 계통에 대한 다양한 조건의 선형해석 결과를 기술하고 있는데, 특히 지역 1의 발전기  $G_1, G_2$ 가 지역 2의 발전기  $G_3, G_4$ 에 대해 약  $180^\circ$  위상차로 진동하는 전형적인 지역간 진동모드가 전체 계통을 지배하고 있다. 이 계통에 대한 선형해석과 모드 해석에 대한 해석은 문헌 [3]에 기술되어 있으므로 이 논문에서는 상세한 기술하지 않는다.

### 5.1. Case 1

Case 1은 지역 1에서 지역 2로 선로를 통하여 흐르는 조류가 작은 경우로 모선 7과 모선 9에 각  $1367\text{MW}$ 의 부하가 있는 경우이다. 이때는 선로를 통하여  $50\text{MW}$ 의 비교적 작은 조류가 흐르고 있다.

그림 10(a)에는 두 지역의 발전기  $G_1 \sim G_4$ 의 출력을 나타내고 있는데, 발전기  $G_1 \sim G_2$ 가 +sync로 진동하고 있고,  $G_3 \sim G_4$ 도 +sync로 진동하고 있다. 그리고 그룹 1( $G_1, G_2$ )과

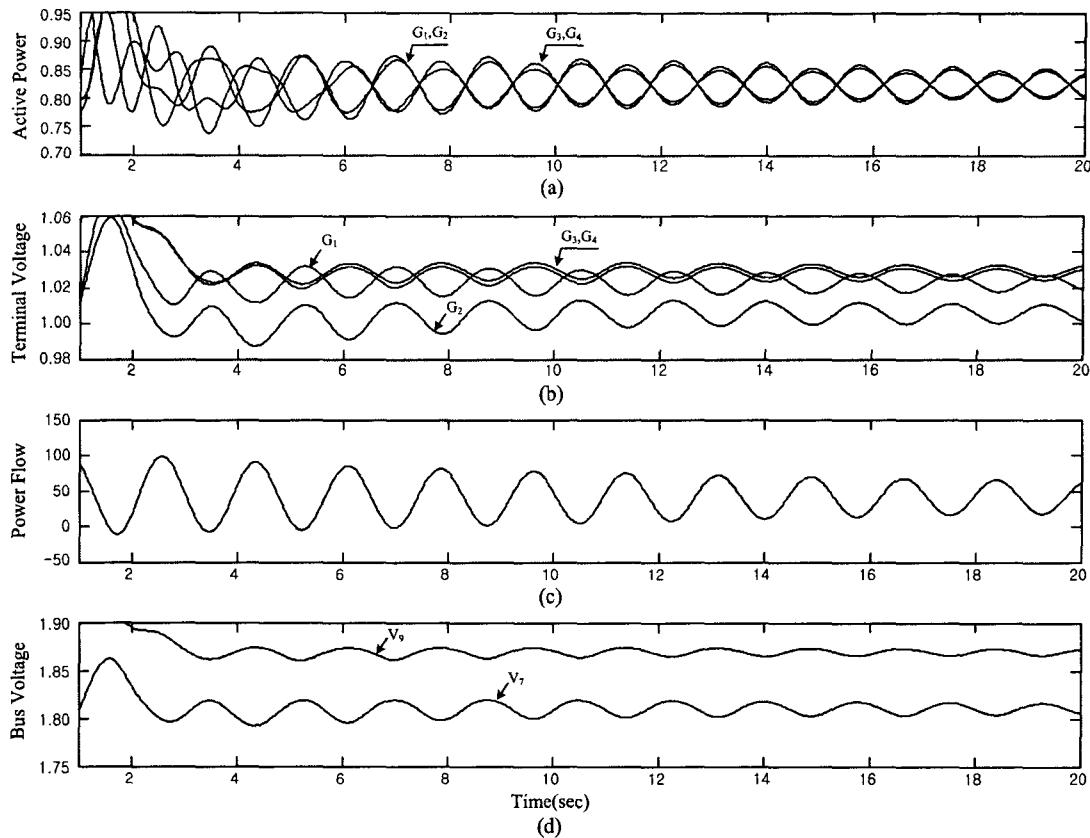


그림 10 Case 1의 시간영역 해석

Fig. 10 Time simulation of Case 1

그룹 2(G3,G4)가 서로 -sync로 진동하고 있다. 그림 10(b)에는 두 지역의 발전기 G1~G4의 단자전압을 나타내고 있는데, 발전기 출력과 동일하게 G1~G2, G3~G4가 각각 +sync로 진동하고 있으며, 그룹 1과 그룹 2가 서로 -sync로 진동하고 있어 정확하게 발전기 출력의 동조와 단자전압의 동조가 일치한다.

3-4장에서 기술한 것과 같이 병렬회로에서 큰 부하전류가 흐르기 위해서 발전기 단자전압은 +sync가 되어야 하고, 발전기 출력도 +sync가 되어야 한다. 그림 10(a)-(b)에서 각 그룹 내부에 발전기 출력과 단자전압이 모두 +sync로 진동하고 있어 이를 확인할 수 있고, 대부분 계통은 한 모선에 연결된 발전기 출력보다 계통 전체의 부하가 훨씬 크므로 대규모 계통에서 한 모선에 연결된 다수 발전기를 사이에 항상 +sync가 발생한다.

제 3장 병렬회로의 동조에서 부하전류가 작을 때, 전압들 사이에 -sync로 동조되는 현상을 기술하였다. 두 지역계통에서 연계선로조류가 작은 경우에 선로 양단 모선 7과 모선 9의 전압이 그림 10(d)와 같이 서로 -sync로 동조되어 운전되고 있다. 이것은 한 모선의 부하가 1367MW이고, 선로조류가 50MW이므로 상대적으로 연계선로를 통하여 흐르는 송전되는 전력이 작으므로 선로를 등가회로로 모의할 때, 부하가 작은 병렬회로로 생각할 수 있다. 따라서 선로 양단 전압은 -sync로 동조하고 있고 그림 10에서 이를 확인할 수 있다.

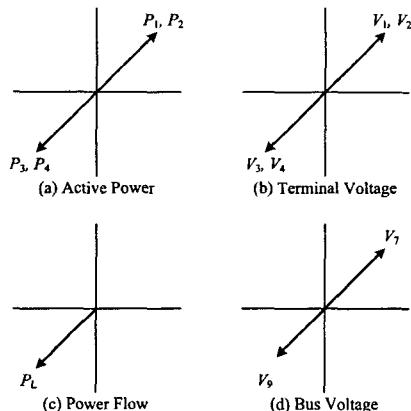


그림 11 Case 1의 벡터도

Fig. 11 Vector diagram of Case 1

그림 10(c)는 각각 선로조류의 시간응답을 나타내고 있는데, 선로조류의 크기가 작으나 양단 모선 전압과 비슷한 주파수로 진동하고 있다.

그림 11에는 그림 10에 나타낸 각 신호들의 벡터도를 나타내고 있다. 앞에서 기술한 것과 같이 그룹 내부의 전압 V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, 전력 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>는 +sync로 동조하고 있고, 그룹(P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>)과 그룹(P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>)은 -sync로 동조하고 있음을 알 수 있다.

### 5.2. Case 2

Case 2는 송전선로가 중부하로 운전되고 있는 경우로 모선 7과 모선 9에 각각 967MW, 1767MW의 부하가 있는 경우이다. 이때는 선로를 통하여 400MW의 큰 조류가 흐르고 있다. 이와 같이 송전선로가 중부하로 운전 중일 때는 선로에서 전압강하가 크게 발생하므로 네트워크에서 발생하는 동조의 양상이 경부하일 때와는 다르게 나타난다. 제 3장에서 기술한 병렬회로의 동조에서 선로전류가 작을 때는 -sync가 발생하고 클 때는 +sync가 발생하는 동조현상을 기술하였다. 중부하로 운전 중인 선로에는 큰 전류가 흐르므로 +sync가 발생할 것으로 예상할 수 있다.

그림 12(a)에는 두 지역의 발전기 G1~G4의 출력을 나타내고 있는데, 발전기 G1~G2, G3~G4가 각각 +sync로 진동하고 있다. 이와 같은 동조는 Case 1에서와 같이 전력계통에서 동일모션에 연결된 발전기의 출력들 사이에는 항상 +sync가 발생함을 확인할 수 있다. 또한 그림 12(b)에는 두 지역의 발전기들의 단자전압을 나타내고 있는데, 발전기 출력과 같이 G1~G2, G3~G4가 모두 +sync로 진동하고 있다.

한편 그림 12(a)에서 그룹 1과 그룹 2 사이에 동조는 Case 1에서와 같이 명확하지 않다. 이것은 G3~G4의 발전기 출력에 대한 진동이 G1~G2 출력의 진동보다 훨씬 커서 계통 전체 진동을 지배하고 있기 때문이다. 그러나 그림 12(b)에 나타나있는 발전기 단자 전압은 두 그룹 사이에 +sync로 동조 되고 있고, 그림 12(d)에 모선 7과 모선 9의 전압도 +sync로 동조되어 운전되고 있다. 이 현상은 4장에

서 기술한 바와 같이 선로는 병렬부하로 취급할 수 있으므로 큰 선로 전류가 흘러 전류변화가 클 때, 모선 사이에 +sync가 발생함을 알 수 있다. 즉 선로를 통하여 연결된 모선 7과 모선 9의 동조 상태가 선로조류의 증가에 따라서 -sync에서 +sync로 변화하였다.

결과적으로 Case 2에서는 연계선로가 중부하로 운전됨으로써 출력의 동조가 -sync에서 +sync나 Qsync로 변화하는 동조 파괴 현상(sync breakdown phenomenon)이 발생하고, 전체 계통이 한 지역의 진동에 좌우되고 있어 전체 진동이 Case 1보다 훨씬 심각함을 알 수 있다.

그림 13에는 그림 12에 나타낸 각 신호들의 벡터도를 나타내고 있다. 모든 신호들이 +sync로 동조되어 있음을 알 수 있다.

한편 대규모 전력계통은 발전기와 선로, 부하들이 서로 복잡하게 연결되어 있어 발전기를 포함한 네트워크에서 발생하는 진동의 형태도 다양하다. 동일한 계통도 제어기의 성능과 부하조건에 따라서 단자전압과 출력들의 동조 형태는 다르다. 그러므로 지금까지 기술한 것과 같이 특정 주파수에 한정되지 않고, 많은 진동자와 그에 대응하는 진동주파수를 가지고 있다. 따라서 대규모 전력계통 해석에 동조현상을 적용하기 위해서는 계통에 크게 영향을 주는 동조를 선별할 수 있어야 한다. 이 논문에서는 전력계통의 동조 현상의 규명에 주안점이 있으므로 제어기나 다른 부하조건에 대한 동조 현상과 대규모 계통에서 동조의 탐색 방법에 대해서는 기술하지 않는다.

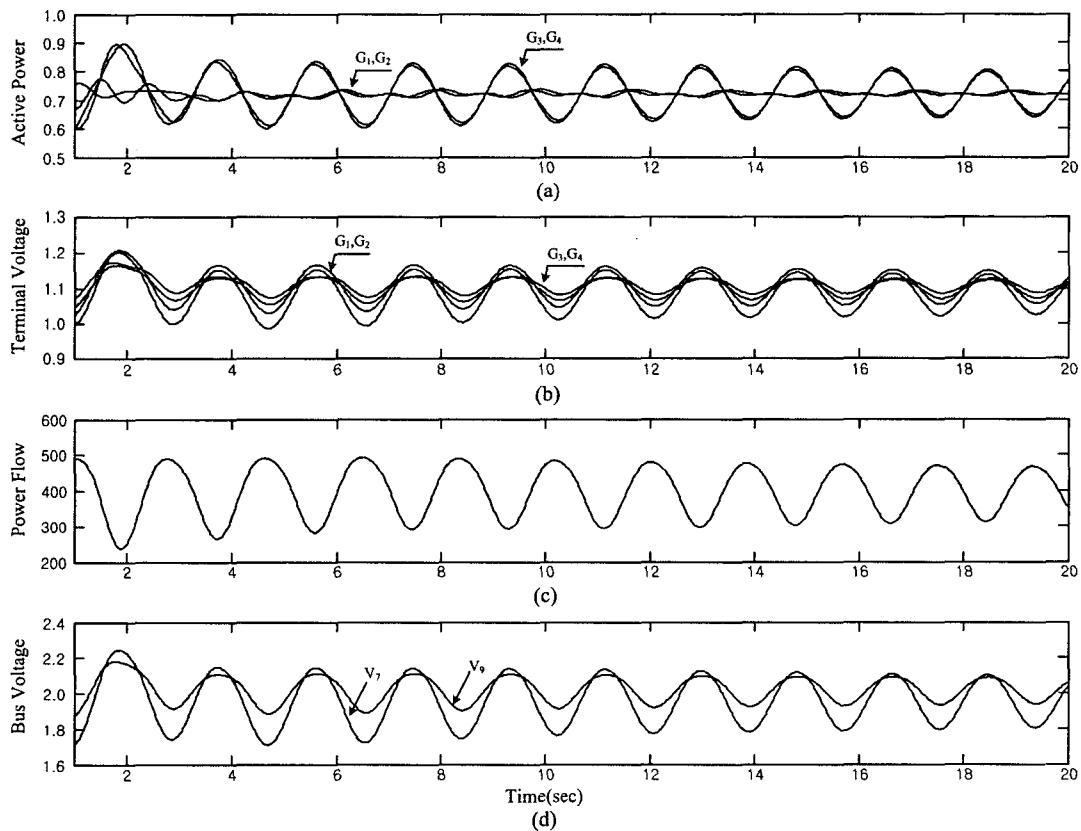


그림 12 Case 2의 시간영역 해석

Fig. 12 Time simulation of Case 2

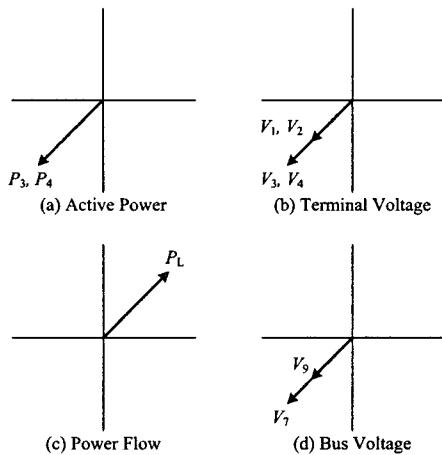


그림 13 Case 2의 벡터도

Fig. 13 Vector diagram of Case 2

## 6. 결 론

다양한 전력기기들로 구성된 전력계통에서 각종 기기들은 동일한 주파수로 동기 되어 운전되는데, 발전기와 부하들은 네트워크를 통하여 상호 병렬 연결되어 있고 부하변동과 같이 항상 외란에 대해서 노출되어 있다. 계통에서 진동은 고유한 특성으로 외란 후 동작점을 중심으로 진동이 진행되고 동시에 다른 진동과 상호작용을 한다.

이 논문에서는 전력계통에서 발생하는 진동이 서로 동조하는 현상에 대해서 기술하였다. 먼저 진동들이 서로 합해지는 양의 동조와 서로 상쇄되는 음의 동조 및 준 동조로 나누어서 동조를 정의하고, 기본 전기회로에서의 전압과 전류사이에 동조 현상을 규명하였다. 그리고 직렬회로와 병렬회로의 동조현상으로부터 전력계통의 동조현상을 해석하였고, 두 지역계통에 대한 시간영역 시뮬레이션을 통해 전력계통에서 발전기 출력들 사이에 발생하는 동조현상을 규명하였다. 전력계통에서 동조 현상은 발전기 출력이나 모선 전압들 사이에 항상 존재하는 현상이다. 따라서 특정한 동작점에 한정되지 않고 계통의 특성을 파악할 수 있는 동조현상은 기초적인 계통운용 및 계획에 이용될 수 있는 정보가 될 수 있다.

### 감사의 글

이 연구는 산업자원부 지원 중기거점과제 및 고려대학교 전력시스템기술연구센터 지원에 의해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] Steven H. Strogatz, Sync : The Emerging Science of Spontaneous Order, Hyperion Books, New York, 2003
- [2] Steven H. Strogatz, "Exploring Complex Networks", Nature, Vol. 410, pp. 268-276, 2001. 3.
- [3] P.Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- [4] Graham Rogers, Power System Oscillations, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 2000.
- [5] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, Power Systems Analysis, Prentice Hall, New York, 1999.

## 저 자 소 개



### 심 관식(沈冠植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~2004년 서남대 전기전자공학과 조교수  
E-mail : simgong@ieee.org



### 남해곤(南海鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(박사). 1975년~1978년 한국전력 원자력건설부 근무.  
1986년~1988년 한국전기연구소 근무. 1988년~현재 전남대 전기공학과 교수  
Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749  
E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr