

## 同期発電機の並行運転時の有効電力・無効電力の解析

畑迫 健一\*

### Analysis of Active Power and Reactive Power during Parallel Operation of Synchronous Generators

Kenichi HATASAKO\*

**Synopsis:** A parallel operation experiment was conducted with two synchronous generators. In parallel operation, a cross current flows between the two generators due to the phase difference of the induced electromotive force, and this cross current causes the active power to lag behind the generator whose phase is advanced. A generator whose phase is delayed reduces active power and advances the phase. Furthermore, it was found that if the magnitude of the induced electromotive force is different during parallel operation, a cross current flows between the two generators, and the reactive power is given from the generator with the large electromotive force to the generator with the small electromotive force. This reactive current reduces the difference in electromotive force between generators.

It was confirmed that the exchange of active power and reactive power works to maintain parallel operation.

(Received Sep. 27.2021)

**Key words:** power generation, parallel operation, microgrid, active power, reactive power

### 1. 緒 言

地球温暖化が進行し環境対策を行うことは人類の喫緊の課題となっている<sup>1)</sup>。環境対策の中で電力エネルギーについては化石燃料を使用した発電から再生可能エネルギーを使用した発電に切り換えることが求められている<sup>2)</sup>。

再生可能エネルギーの使用拡大の方法として、比較的狭い地域の中で発電から電気の使用までを行う Fig.1 に示すようなマイクログリッド方式が採用されている<sup>3)</sup>。マイクログリッド方式では、複数の発電設備を電力ネットワークに接続して電力供給を分担することにより、電力供給量の拡大や供給の安定化を行っている<sup>4,5)</sup>。

今回、疑似マイクログリッド設備<sup>6)</sup>を用いて電力ネットワークに複数の発電機を接続した並行運転について調査したのでその内容を報告する。並行運転とは複数の発電機が以下の条件を満たしている必要がある。

- ・誘導起電力の大きさが等しい
- ・誘導起電力の周波数が等しい
- ・誘導起電力の位相が等しい

実際には、誘導起電力の大きさ、周波数、位相をすべて完全に一致させることは難しく、発電機間の差が発生してしまう。この差が原因で発電機間に意図しない電流が流れ、並行運転に影響を与える。今回の実験により、この電流により有効電力(Active Power)と無効電力(Reactive Power)が発生し、これらの電力が発電機の並行運転を維持するように作用していることが判明した。

\* 産業技術短期大学教授 博士(工学) 電気電子工学科

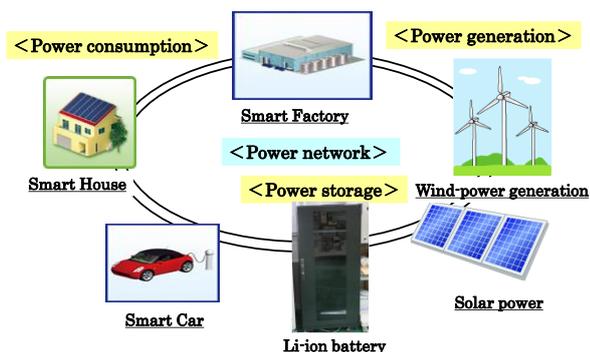


Fig. 1 Power supply network using microgrid system.

## 2. 実験と結果

### 2.1 実験設備

実験に使用した疑似マイクログリッド設備の写真と回路図を Figs.2, 3 にそれぞれ示す。Fig.2 (a)は電動機、発電機の写真を、Fig.2 (b)は LCR 負荷装置の写真をそれぞれ示す。発電機は Fig.3 に示すように 2 台を並列に接続している。今回の実験では同じ型式の 2 台の同期発電機を用いて実験した。同期発電機は電動機で駆動させ、1 号機の電動機は直流複分巻電動機、2 号機の電動機は直流分巻電動機をそれぞれ使用している。電動機、発電機の性能を表 1 に示す。電動機の違いに起因する発電特性の違いも実験の中で見られた。



(a) Photograph of generation system. The left side is Unit 1, and the right side is Unit 2.



(b) Photograph of LCR load equipment.

Fig. 2 Photograph of the equipment used in the experiment.

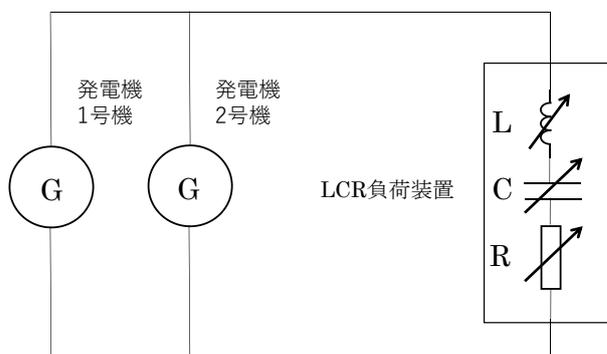


Fig. 3 Circuit diagram of the equipment used in the experiment, which is filled in only one phase of the three-phase wiring.

Table 1 Motor and generator specifications.

装置NO.	電動機	発電機
1号機	直流複分巻電動機 DC100V 29A 1800RPM	三相同期発電機 三相200V 2KVA 1800RPM
2号機	直流分巻電動機 DC100V 29A 1800RPM	三相同期発電機 三相200V 2KVA 1800RPM

### 2.2 周波数と使用電力の関係の調査実験

発電量を一定にした状態で発電機の負荷量（電力量）を変化させて周波数と電力の関係を調査した。1号機、2号機の単体の特性と1号機と2号機を負荷配分50%ずつで並行運転したときのデータを Fig.4 に示す。

使用電力が大きくなるにつれてどの条件においても周波数が下がっていくことがわかる。また、Fig.4 の並行運転の条件は負荷配分を 50%に設定しているが、並行運転のデータは 1 号機単独と 2 号機単独の条件の間の値を取ることがわかった。つまり、1 号機の周波数は単独の時よりも周波数は増加し、2 号機の周波数は単独の時よりも減少することがわかった。

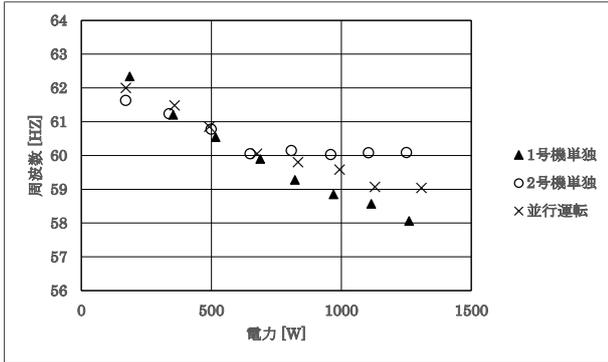


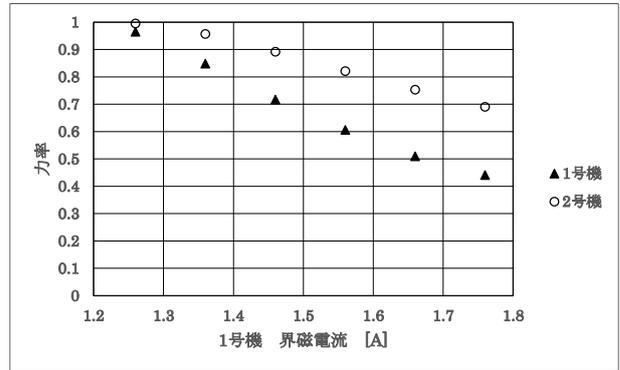
Fig. 4 Relationship between frequency and power under fixed motor conditions.

2.3 並行運転時の発電電力を変化させたときの特性調査

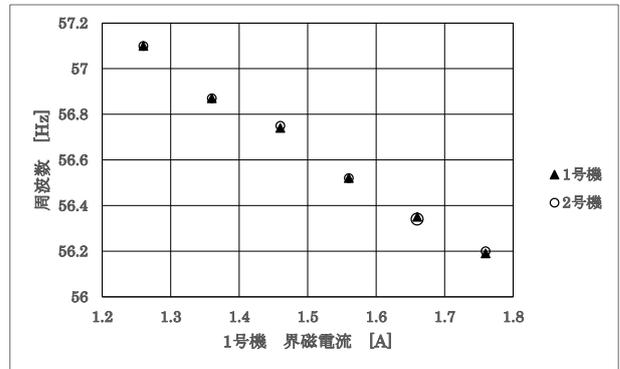
並行運転時の発電量を変化させるために発電機の界磁電流を変化させたときの周波数、力率、電圧、電力の変化について調査した。

1 号機と 2 号機を並行運転しているときに、1 号機だけの発電機の界磁電流を変化させたときの周波数、力率、電圧、電力の変化を Fig.5 に、1 号機と 2 号機の両方の界磁電流を変化させたときの周波数、力率、電圧、電力の変化を Fig.6 にそれぞれ示す。なお、Fig.6 の 1 号機、2 号機ともに界磁電流を変化させたときの変化量は Fig.5 の 1 号機だけの界磁電流を変化させたときの半分に設定している。力率については、電圧、電流の位相の関係により±の符号が発生するが、1 号機、2 号機では位相は 180°ずれるため、符号を省略し絶対値のみ記入している。

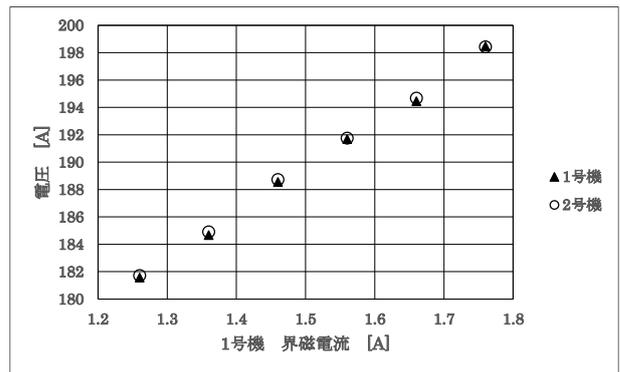
Figs.5,6 を比較すると、周波数、電圧、電力はよく似た変化をしているが、力率については、1 号機、2 号機の両方の界磁電流を変化させたとき Fig.6 の力率はほとんど変化していないのに対して、1 号機だけの界磁電流を変化させた Fig.5 では 0.5 (50%) 程度も大きく変化していることが判明した。



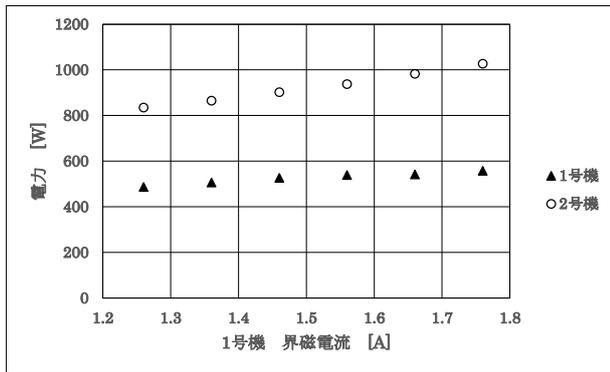
(a) Change in power factor.



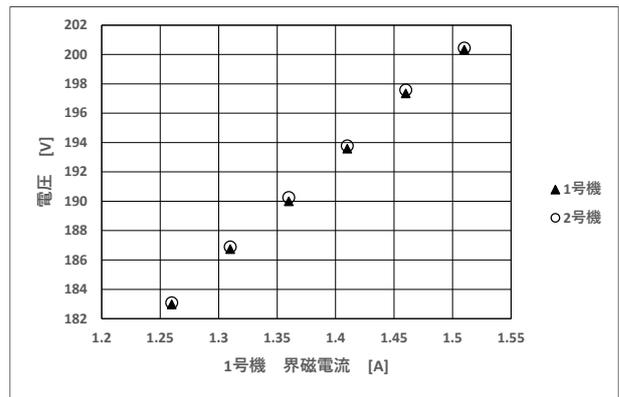
(b) Change in frequency.



(c) Change in voltage.

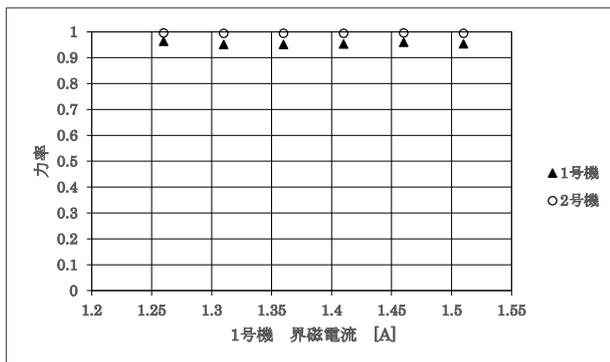


(d) Change in power.

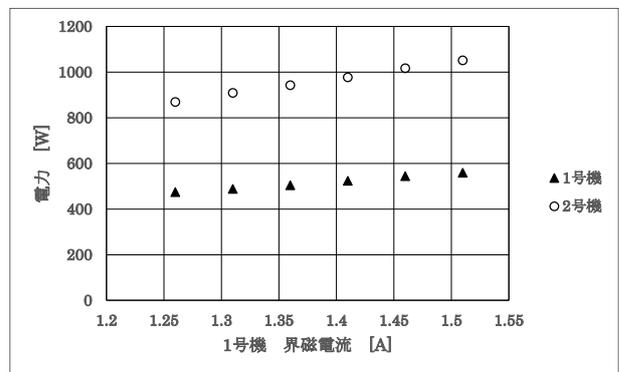


(c) Change in voltage.

**Fig. 5** Changes in power factor (a), frequency (b), voltage (c), and power (d) when the field current of only one generator is changed.

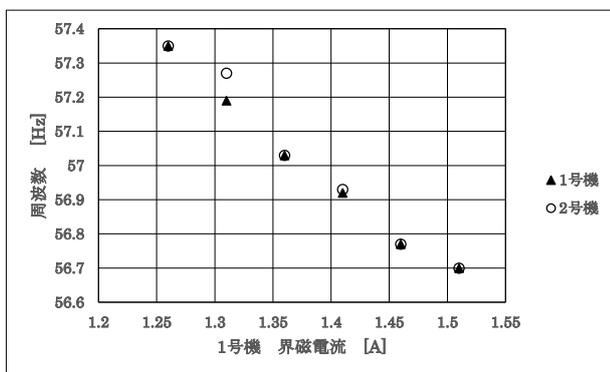


(a) Change in power factor.



(d) Change in power.

**Fig. 6** Changes in power factor (a), frequency (b), voltage (c), and power (d) when the field currents of both generators are changed.



(b) Change in frequency.

### 3. 実験結果の考察

#### 3.1 周波数と使用電力の関係

Fig.4 の結果より、発電量が一定のときに使用電力を増やすと周波数が減少することが確認できた、これは、発電電力量  $P_m$  と使用電力量  $P_e$  との関係において以下の電力揺動方程式を満たしていることを確認できた<sup>3)</sup>。

$$P_m = P_e + M \cdot \frac{df}{dt} \quad (1)$$

$P_m$  : 発電電力量 [W]

$P_e$  : 使用電力量 [W]

$M$  : 慣性定数 [ $W \cdot s^2$ ]

$f$  : 周波数 [Hz]

また、Fig.4 において、1号機と2号機は同じ型式の同期発電機を使用しているにも関わらず周波数と電力量の関係が高い電力量側で差が大きくなっている。これは 1

号機の同期発電機は複分巻電動機で駆動しているので負荷量と電動機の回転数はほぼ直線的な特性になっているが、2号機は分巻電動機で駆動しているため重負荷（高電力）においても電動機の回転数が下がらず周波数はほぼ一定の値が保たれていることが原因であると考えられる<sup>6)</sup>。

**3.2 単独運転と並行運転のときの発電量の違い**

2 台の発電機が並行運転しているときの等価回路を考える。電機子巻線抵抗  $R$  は電機子リアクタンス  $X_s$  に対して、 $R \ll X_s$  であるので、無視すると等価回路は Fig.7 になる。

Fig.7 の等価回路において、以下の関係式が成立する。

$$i = i_1 + i_2 \tag{2}$$

$$\dot{V} = \dot{E}_1 - jX_{S1} \cdot \dot{i}_1 = \dot{E}_2 - jX_{S2} \cdot \dot{i}_2 \tag{3}$$

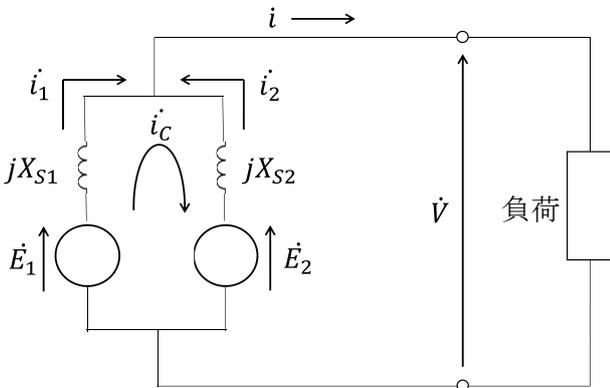
ここで、 $\dot{i}_1$ 、 $\dot{i}_2$  は発電機 1 号機、2 号機を流れる電流を、 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  は発電機 1 号機、2 号機の誘導起電力を、 $X_{S1}$ 、 $X_{S2}$  は発電機 1 号機、2 号機の電機子リアクタンスをそれぞれ示す。また、 $j$  は虚数 ( $j^2 = -1$ ) を示す。

(2)、(3) 式を  $\dot{i}_1$ 、 $\dot{i}_2$  について解くと以下の関係式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 &= \frac{X_{S2}}{X_{S1} + X_{S2}} \dot{i} + \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{j(X_{S1} + X_{S2})} \\ &= \dot{i}_1 + \dot{i}_c \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_2 &= \frac{X_{S1}}{X_{S1} + X_{S2}} \dot{i} - \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{j(X_{S1} + X_{S2})} \\ &= \dot{i}_2 - \dot{i}_c \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 $\dot{i}_c$  は  $\dot{E}_1 \neq \dot{E}_2$  のときに流れる横流となる。



**Fig. 7** Equivalent circuit of generators and load used in the experiment.

Fig.4 の並行運転の状態について考える。単独運転から並行運転に移行するときには、1、2号機間の電圧を合わせ、同期検定機により位相を合わせ込んでから並列運転に投入している。つまり、

$$E_1 = E_2 \tag{6}$$

$$f_1 = f_2 \tag{7}$$

$$\phi_1 = \phi_2 \tag{8}$$

ここで、 $E_1$ 、 $E_2$  は誘導起電力  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  の大きさを、 $f_1$ 、 $f_2$  は発電機 1 号機、2 号機の周波数を、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  は発電機 1 号機、2 号機の位相をそれぞれ示す。

が成立している。しかし、発電量を変化させていくと (1) 式に従い周波数が Fig.4 のように変化する。周波数が変わるときに 1、2 号機の発電機の誘導起電力  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  の間には位相差が発生する。この状態のベクトル図を Fig.8 に示す。

Fig. 8 において、

$$E_1 = E_2 (\equiv E_0) \tag{9}$$

であるが、 $\dot{E}_1$  と  $\dot{E}_2$  の位相差が  $\delta$  だけあるとすると ( $\dot{E}_1$  が  $\dot{E}_2$  よりも進んでいると仮定)、 $(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)$  の誘導起電力により  $\pi/2$  だけ遅れた循環電流  $\dot{i}_c$  が流れる。

Fig. 8 より、以下の関係式を得る。

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{\frac{1}{2}(X_{S1} + X_{S2})i_c}{E_0} \tag{10} \text{ より、}$$

$$i_c = \frac{2E_0}{X_{S1} + X_{S2}} \sin \frac{\delta}{2} \tag{11}$$

循環電流  $\dot{i}_c$  は  $\dot{E}_1$  に対して有効成分を持つため 1 号機に対して 1 相当り、以下の有効電力  $P_c$  を発生し負荷を増加させる。

$$\begin{aligned} P_c &= E_0 i_c \cos \frac{\delta}{2} = E_0 \frac{2E_0}{X_{S1} + X_{S2}} \sin \frac{\delta}{2} \cos \frac{\delta}{2} \\ &= \frac{E_0^2}{X_{S1} + X_{S2}} \sin \delta \end{aligned} \tag{12}$$

今回の Fig.4 の結果では、1 号機の周波数が低いため、誘導起電力  $\dot{E}_1$  と  $\dot{E}_2$  の位相差  $\delta$  は負の値となり、1 号機の負荷は有効電力  $P_c$  だけ減少する。このため、1 号機は負荷が減少すると (1) 式に従い加速運転を行うようになり周波数が上昇する。一方、2 号機は有効電力  $P_c$  だけ負荷が増加するので、減速して周波数が下がることになる。

横流  $\dot{i}_c$  は有効電力を持ち有効電力により  $\dot{E}_1$  と  $\dot{E}_2$  の位相を一致させ並行運転を維持するにはたらいていることがわかった<sup>7,8)</sup>。

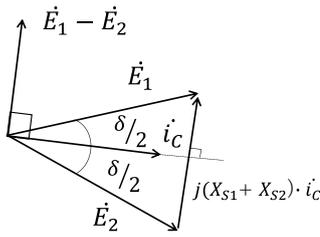


Fig. 8 Vector diagram when there is a phase difference between  $E_1$  and  $E_2$ .

3.3 並行運転時の発電機の界磁電流変化の影響

2.3の実験において、並行運転時に発電機の界磁電流を変化させる実験を行った。界磁電流を変化させると電動機の誘導起電力が変化する。

1号機、2号機両方の界磁電流を等量変化させた Fig.6の実験においては、 $E_1 = E_2$ の関係が維持されて誘導起電力の大きさが変化している。一方、1号機だけの界磁電流を変化させたときには1号機の誘導起電力だけが大きくなり、 $E_1 \neq E_2$  ( $E_1 > E_2$ ) となってしまう。 $E_1 > E_2$ のときのベクトル図を Fig.9 に示す。

Fig.9において、 $(E_1 - E_2)$  に比例した  $90^\circ$ 位相が遅れた電流  $i_c$  ((4)式の第2項の電流) が発電機1号機から2号機に流れる。電流  $i_c$  は1号機では  $90^\circ$ 遅れの流出電流であり、1号機の誘導起電力  $E_1$  を減磁作用により低下させる。一方、電流  $i_c$  は2号機では  $90^\circ$ 進みの流入電流となり、2号機の誘導起電力  $E_2$  を増磁作用により増加させる。

電流  $i_c$  はどちらの発電機にとっても無効電流となり無効電力を伝達するだけとなり、有効電力には影響を与えない。このため、図5の結果では、界磁電流を上げると力率が大きく低下する結果になった。

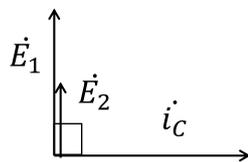


Fig. 9 Vector diagram when  $E_1$  and  $E_2$  are not equal.

4. 結 言

2 台の同期発電機による並行運転実験を行った。発電量が一定のときに電力使用量（負荷量）を増やすと周波数が低下した。電力揺動方程式に従って周波数が変化することを確認した。また、並行運転では、2 台の発電機間の誘導起電力の位相差により 2 台の発電機間に横流が流れ、この横流により位相の進んでいる発電機の有効電力の分担が増えて位相が遅れ、位相の遅れている発電機では有効電力の分担が減り位相が進んでいく。さらに、並行運転時に誘導起電力の大きさが異なると 2 台の発電機間に横流が流れ誘導起電力の大きい発電機の誘導起電力を下げ、誘導起電力の小さい発電機の誘導起電力上げることが判明した。このときは無効電力だけの伝達となる。

有効電力のやり取りは位相の進んでいる発電機の位相を遅らせ位相の遅れている発電機の位相を進めるはらたきを行い、無効電力のやり取りは誘導起電力の大きい発電機の誘導起電力を小さくし誘導起電力の小さい発電機の誘導起電力を大きくするにはたらくことが判明した。つまり、有効電力と無効電力のやり取りは並行運転を維持するにはたらくことを確認した。

参考文献

- 1) 経済産業省：“地球温暖化対策計画”，経済産業省ホームページ  
<[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ontaikeikaku/ontaikeikaku.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ontaikeikaku/ontaikeikaku.html)> , (参照 2021-09-11) .
- 2) 環境省，“地地球温暖化対策”，環境省ホームページ  
<<https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka.html>> , (参照 2021-09-11) .
- 3) K. Hatasako et al., IEICE Trans. Electronics, **E97-C 4** (2014)238-244.
- 4) 長谷川淳他：電力系統工学，電気学会，2002.
- 5) 前田隆文：電力系統，オーム社，2019.
- 6) 畑迫健一，久次米利彦：産業技術短期大学誌，**53** (2020), 139-142.
- 7) 天野寛徳，他：電気機械工学，電気学会，1985.
- 8) 穴澤 義久：同期発電機の並行運転 発電機の基礎知識 6, Tech Note powered by IPROS  
<<https://www.ipros.jp/technote/basic-generator6/>> , (参照 2021-09-11)