

# パワーアナライザ PW6001 による PMSM のパラメータ同定方法

本技術資料は、PMSM（Permanent Magnet Synchronous Motor：永久磁石同期モータ）のベクトル制御を行う上で必須であるモータパラメータ（ $L_d, L_q, K_e$  等）の同定を、弊社パワーアナライザ PW6001 により簡単に行う方法を示す。

## 1 同定原理

$d$ - $q$  座標軸上で表現した PMSM の電圧方程式は、

- i) 固定子と回転子間の空隙内の磁束の空間分布は、空隙に沿って正弦波状である。
- ii) 電圧および電流の高調波成分は無視できる。
- iii) 鉄損は無視できる。

を仮定すると、次式となる<sup>1)</sup>。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

ここで、 $v_d, v_q$  は各相電機子電圧の  $d$  軸、 $q$  軸成分、 $i_d, i_q$  は各相電機子電流の  $d$  軸、 $q$  軸成分、 $R$  は各相電機子抵抗、 $p$  は微分演算子 ( $d/dt$ )、 $L_d, L_q$  は  $d$  軸、 $q$  軸の自己インダクタンス、 $\omega$  は回転角（電気角）速度、 $\phi_a (= K_e)$  は永久磁石の電機子鎖交磁束の実効値（誘起電圧定数）である。

定常状態を仮定（時間微分項を無視）し、式 (1.1) を  $d$  軸、 $q$  軸のベクトル図で表すと、Fig.1.1 となる。ここで、 $v_1, i_1$  はそれぞれ相電圧、相電流の基本波成分、 $\theta_v, \theta_i$  は相電圧、相電流の基本波位相角である。Fig.1.1 から、 $d$  軸、 $q$  軸方向の電圧方程式はそれぞれ、

$$K_e \omega + Ri_q = v_q - \omega L_d i_d \quad (1.2)$$

$$v_d = Ri_d - \omega L_q i_q. \quad (1.3)$$

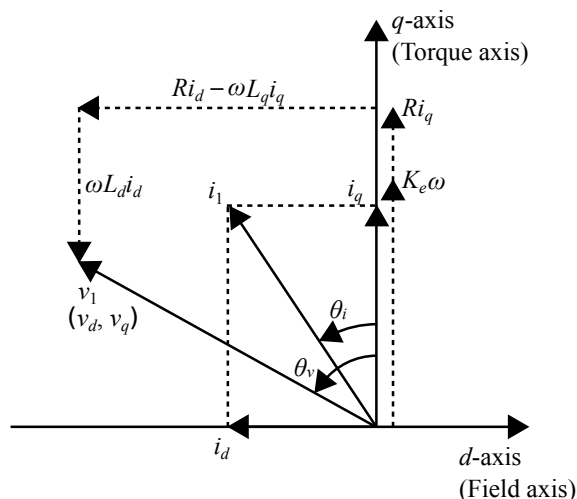


Fig. 1.1 PMSM のベクトル図。

これらを  $L_d, L_q$  について解くと、

$$L_d = \frac{v_q - K_e \omega - Ri_q}{\omega i_d} \quad (1.4)$$

$$L_q = \frac{Ri_d - v_d}{\omega i_q}. \quad (1.5)$$

## 2 同定手順

### 2.1 各相電機子抵抗 $R$ の測定

抵抗計等を用いることにより、予め各相電機子抵抗  $R$  を測定しておく。

### 2.2 位相ゼロアジャストの実行および誘起電圧定数 $K_e$ の同定

測定対象となる PMSM のモータ端子を開放状態（ $i_d = i_q = 0$ ）にした上で、モータ端子を PW6001

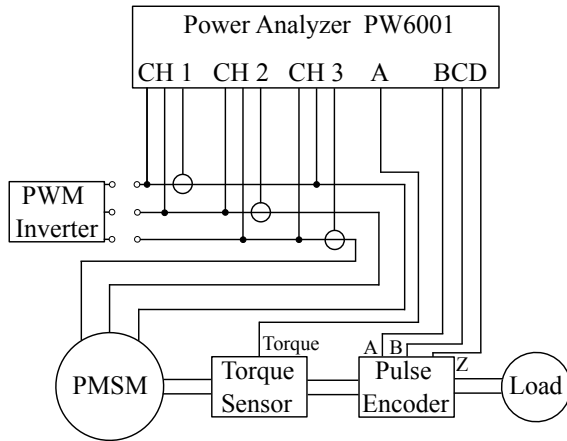


Fig. 2.2 位相ゼロアジャストの実行および誘起電圧定数  $K_e$  の同定時の結線。

の CH 1, 2, 3 の電圧入力に接続する。さらに、エンコーダの A 相パルス出力を CH B, B 相パルス出力を CH C, Z 相パルス（原点信号）出力を CH D にそれぞれ接続する (Fig.2.2)。

PW6001 の設定については、モータ解析の動作モードを Single, 測定項目を Torque Speed Direction Origin, CH B の入力設定を Pulse に設定する。また、CH 1, 2, 3 の結線を 3P3W3M, 同期ソースを Ext1 に設定して、 $\Delta$  変換の設定を ON にする。同期ソースを Ext1 に設定することにより、入力されるエンコーダパルスを基準として電圧、電流の位相角を測定でき、 $\Delta$  変換を ON にすることによって、線電圧を相電圧に変換して測定できる。

この状態で負荷側からモータを駆動し、誘起電圧を発生させて、PW6001 の位相ゼロアジャストを実行する。これにより、 $\theta_v, \theta_i$  は  $q$  軸方向に発生する誘起電圧位相を基準とした位相角、すなわち電気角となる。

また、この時、誘起電圧  $v_q = v_1$  が成り立ち、式 (1.4) は、

$$K_e = \frac{v_q}{\omega} = \frac{v_1}{2\pi f_1} \quad (2.6)$$

となって、 $K_e$  を同定することができる。ここで、 $f_1 (= \omega/2\pi)$  は相電圧の基本波の周波数である。

### 2.3 ユーザ定義演算機能によるモータパラメータ $L_d, L_q$ の同定

2.1 項で測定した  $R$ , 2.2 項で同定した  $K_e$  を用いて、 $d$  軸、 $q$  軸方向の自己インダクタンス ( $L_d, L_q$ ) を同定できる。2.2 項で開放状態であったモータ端子に駆動用のインバータ出力を接続し、モータを運転する (Fig.2.3)。この時、Fig.1.1 から、

$$v_d = -v_1 \sin \theta_v \quad (2.7)$$

$$v_q = v_1 \cos \theta_v \quad (2.8)$$

$$i_d = -i_1 \sin \theta_i \quad (2.9)$$

$$i_q = i_1 \cos \theta_i \quad (2.10)$$

が成り立ち、これらと式 (1.4), (1.5) をユーザ定義演算 (UDF : User Defined Function) に設定すれば、 $v_d, v_q, i_d, i_q$  をモニタしながら、 $L_d, L_q$  を簡単に同定できる。

具体的な設定例を以下に示す。まず、UDF<sub>1-4</sub> には、それぞれ  $v_d, v_q, i_d, i_q$  を設定する。

$$\text{UDF}_1 = -U_{\text{fnd1}} \cdot \sin \theta_{U1}$$

$$\text{UDF}_2 = U_{\text{fnd1}} \cdot \cos \theta_{U1}$$

$$\text{UDF}_3 = -I_{\text{fnd1}} \cdot \sin \theta_{I1}$$

$$\text{UDF}_4 = I_{\text{fnd1}} \cdot \cos \theta_{I1}$$

ここで、 $U_{\text{fnd1}}, I_{\text{fnd1}}, \theta_{U1}, \theta_{I1}$  は PW6001 の CH 1 の基本測定項目の表記であって、それぞれ、電圧、電流実効値の基本波成分、電圧、電流位相角を表し、

$$U_{\text{fnd1}} = v_1$$

$$I_{\text{fnd1}} = i_1$$

$$\theta_{U1} = \theta_v$$

$$\theta_{I1} = \theta_i$$

が成り立つ。

次に、 $L_d$  を設定する。式 (1.4) の分子第 2 項および第 3 項は、

$$\text{UDF}_5 = (2\pi K_e) \cdot f_1 + R \cdot \text{UDF}_4.$$

式 (1.4) の分母は、

$$\text{UDF}_6 = (2\pi) \cdot f_1 \cdot \text{UDF}_3.$$

従って、 $L_d$  は、

$$\text{UDF}_7 = \text{UDF}_2 / \text{UDF}_6 - \text{UDF}_5 / \text{UDF}_6.$$

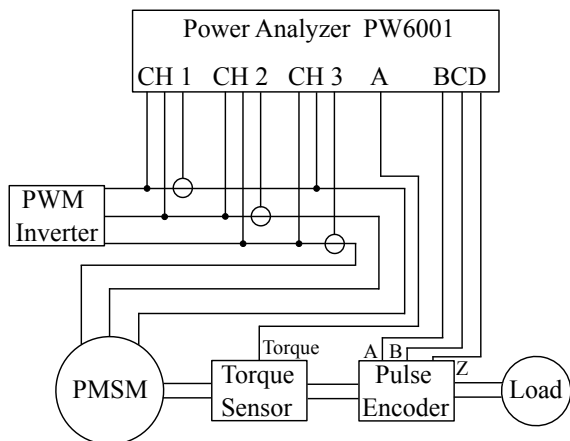


Fig. 2.3 モータパラメータ  $L_d, L_q$  の同定時の結線.

最後に,  $L_q$  を設定する. 式 (1.5) の分子は,

$$\text{UDF}_8 = R \cdot \text{UDF}_3 - \text{UDF}_1.$$

式 (1.5) の分母は,

$$\text{UDF}_9 = (2\pi) \cdot f_1 \cdot \text{UDF}_4.$$

従って,  $L_q$  は,

$$\text{UDF}_{10} = \text{UDF}_8 / \text{UDF}_9.$$

となる.

以上,  $\text{UDF}_{1-10}$  を設定した際のパワーアナライザ PW6001 の UDF 設定画面を Fig.2.4-2.6 に示す. ここで, Fig.2.5 では,  $R = 0.9[\Omega]$ ,  $K_e = 32[\text{mV} \cdot \text{s}/\text{rad}]$  としており,  $\text{UDF}_5$  の右辺第 1 項には,

$$\begin{aligned} 2\pi K_e &= 2 \cdot 3.14159 \cdot 32 \times 10^{-3} \\ &= 201.062 \times 10^{-3} \\ &= 201.062\text{m}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

$\text{UDF}_5$  の右辺第 3 項,  $\text{UDF}_8$  の右辺第 1 項には, 0.9 が設定されている.

## 参考文献

- 1) 森本 茂雄, 武田 洋次, 平紗 多賀男: PM モータの  $dq$  等価回路定数の測定方法, 電気学会論文誌 D, Vol.113-D (1993) No.11 pp.1330-1331.

## 文書改訂履歴

| 日付          | バージョン | 変更内容 |
|-------------|-------|------|
| 2015 年 11 月 | 1.0   | 初版   |
| 2016 年 03 月 | 1.1   | 誤記修正 |
| 2016 年 09 月 | 1.2   | 誤記修正 |

| 0000-00-00 00:00:00 |                   |   |               |  |     |  |     |  |  | Internal<br>USB |  |
|---------------------|-------------------|---|---------------|--|-----|--|-----|--|--|-----------------|--|
| UDF <sub>1</sub> =  | neg               | * | sin           |  | OFF |  | OFF |  |  | WIRING          |  |
|                     | U <sub>ind1</sub> |   | $\theta_{U1}$ |  |     |  |     |  |  |                 |  |
| MAX                 |                   |   | Unit          |  |     |  |     |  |  | CHANNEL         |  |
| UDF <sub>2</sub> =  |                   | * | cos           |  | OFF |  | OFF |  |  | COMMON          |  |
|                     | U <sub>ind1</sub> |   | $\theta_{U1}$ |  |     |  |     |  |  |                 |  |
| MAX                 |                   |   | Unit          |  |     |  |     |  |  |                 |  |
| UDF <sub>3</sub> =  | neg               | * | sin           |  | OFF |  | OFF |  |  | EFFICIENCY      |  |
|                     | I <sub>ind1</sub> |   | $\theta_{I1}$ |  |     |  |     |  |  |                 |  |
| MAX                 |                   |   | Unit          |  |     |  |     |  |  |                 |  |
| UDF <sub>4</sub> =  |                   | * | cos           |  | OFF |  | OFF |  |  |                 |  |
|                     | I <sub>ind1</sub> |   | $\theta_{I1}$ |  |     |  |     |  |  |                 |  |
| MAX                 |                   |   | Unit          |  |     |  |     |  |  |                 |  |
|                     |                   |   |               |  |     |  |     |  |  | 1-4             |  |
|                     |                   |   |               |  |     |  |     |  |  | 5-8             |  |
|                     |                   |   |               |  |     |  |     |  |  | 9-12            |  |
|                     |                   |   |               |  |     |  |     |  |  | 13-16           |  |
|                     |                   |   |               |  |     |  |     |  |  | MOTOR           |  |

Fig. 2.4 ユーザ定義演算式 (UDF<sub>1-4</sub>) の設定例.

| 0000-00-00 00:00:00 |                  |   |                  |   |                  |   |                  |  |  | Internal<br>USB |  |
|---------------------|------------------|---|------------------|---|------------------|---|------------------|--|--|-----------------|--|
| UDF <sub>5</sub> =  | +201.062m        | * | f <sub>i</sub>   | + | +0.90000         | * | UDF <sub>4</sub> |  |  | WIRING          |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |   |                  |  |  |                 |  |
| UDF <sub>6</sub> =  | +6.28319         | * | f <sub>i</sub>   | * | UDF <sub>3</sub> |   | OFF              |  |  | CHANNEL         |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |   |                  |  |  |                 |  |
| UDF <sub>7</sub> =  | UDF <sub>2</sub> | / | UDF <sub>6</sub> | - | UDF <sub>5</sub> | / | UDF <sub>6</sub> |  |  | COMMON          |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |   |                  |  |  |                 |  |
| UDF <sub>8</sub> =  | +0.90000         | * | UDF <sub>3</sub> | - | UDF <sub>1</sub> |   | OFF              |  |  | EFFICIENCY      |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |   |                  |  |  |                 |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |   |                  |  |  | 1-4             |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |   |                  |  |  | 5-8             |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |   |                  |  |  | 9-12            |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |   |                  |  |  | 13-16           |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |   |                  |  |  | MOTOR           |  |

Fig. 2.5 ユーザ定義演算式 (UDF<sub>5-8</sub>) の設定例.

| 0000-00-00 00:00:00 |                  |   |                  |   |                  |  |     |  |  | Internal<br>USB |  |
|---------------------|------------------|---|------------------|---|------------------|--|-----|--|--|-----------------|--|
| UDF <sub>9</sub> =  | +6.28319         | * | f <sub>i</sub>   | * | UDF <sub>4</sub> |  | OFF |  |  | WIRING          |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |  |     |  |  |                 |  |
| UDF <sub>10</sub> = | UDF <sub>8</sub> | / | UDF <sub>9</sub> |   | OFF              |  | OFF |  |  | CHANNEL         |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |  |     |  |  |                 |  |
| UDF <sub>11</sub> = | OFF              |   | OFF              |   | OFF              |  | OFF |  |  | COMMON          |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |  |     |  |  |                 |  |
| UDF <sub>12</sub> = | OFF              |   | OFF              |   | OFF              |  | OFF |  |  | EFFICIENCY      |  |
| MAX                 |                  |   | Unit             |   |                  |  |     |  |  |                 |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |  |     |  |  | 1-4             |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |  |     |  |  | 5-8             |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |  |     |  |  | 9-12            |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |  |     |  |  | 13-16           |  |
|                     |                  |   |                  |   |                  |  |     |  |  | MOTOR           |  |

Fig. 2.6 ユーザ定義演算式 (UDF<sub>9-12</sub>) の設定例.