

Teoria Sterowania Napięciowego Silników Krokowych

Silniki krokowe są powszechnie stosowane w aplikacjach wymagających precyzyjnego pozycjonowania i kontroli prędkości. Tradycyjnie sterowanie nimi opiera się na kontroli prądu w uzwojeniach, jednak nowoczesne podejścia wykorzystują sterowanie napięciowe, które uwzględnia zjawisko siły elektromotorycznej wstecznej (Back Electromotive Force, BEMF) oraz indukcyjność uzwojeń. Takie podejście pozwala na bardziej efektywne i ciche sterowanie silnikiem.

Model matematyczny silnika krokowego

Aby zrozumieć sterowanie napięciowe, należy najpierw przedstawić model matematyczny silnika krokowego. Rozważmy dwufazowy silnik krokowy z uzwojeniami oznaczonymi jako faza A i faza B.

Równania napięciowe

Napięcia przyłożone do uzwojeń można opisać równaniami:

$$\begin{aligned}u_A(t) &= R \cdot i_A(t) + L \frac{di_A(t)}{dt} + e_A(t), \\u_B(t) &= R \cdot i_B(t) + L \frac{di_B(t)}{dt} + e_B(t),\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie:

- $u_A(t)$, $u_B(t)$ — napięcia przyłożone do faz A i B,
- $i_A(t)$, $i_B(t)$ — prądy płynące przez fazy A i B,
- R — rezystancja uzwojeń,
- L — indukcyjność uzwojeń,
- $e_A(t)$, $e_B(t)$ — siły elektromotoryczne wsteczne (BEMF) w fazach A i B.

Siła elektromotoryczna wsteczna (BEMF)

BEMF jest generowana przez ruch wirnika i można ją wyrazić jako:

$$\begin{aligned}e_A(t) &= K_e \cdot \omega(t) \cdot \sin(\theta(t)), \\e_B(t) &= K_e \cdot \omega(t) \cdot \cos(\theta(t)),\end{aligned}\tag{2}$$

gdzie:

- K_e — stała BEMF,
- $\omega(t)$ — prędkość kątowna wirnika,
- $\theta(t)$ — kąt położenia wirnika.

Moment elektromagnetyczny

Moment generowany przez silnik jest sumą momentów wytwarzanych przez poszczególne fazy:

$$M(t) = K_t [i_A(t) \cdot \sin(\theta(t)) + i_B(t) \cdot \cos(\theta(t))], \quad (3)$$

gdzie K_t to stała momentu.

Sterowanie napięciowe

W sterowaniu napięciowym kluczowe jest odpowiednie kształtowanie napięć $u_A(t)$ i $u_B(t)$, aby uzyskać pożądany moment i prędkość obrotową. W tym celu należy uwzględnić zarówno BEMF, jak i indukcyjność uzwojeń.

Kompensacja BEMF

Aby zapewnić stabilną pracę silnika, sterownik musi kompensować wpływ BEMF. Oznacza to, że napięcie przyłożone do uzwojeń powinno uwzględniać wartość BEMF:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= R \cdot i_A(t) + L \frac{di_A(t)}{dt} + K_e \cdot \omega(t) \cdot \sin(\theta(t)), \\ u_B(t) &= R \cdot i_B(t) + L \frac{di_B(t)}{dt} + K_e \cdot \omega(t) \cdot \cos(\theta(t)). \end{aligned} \quad (4)$$

Sterowanie prądem

Chociaż sterowanie napięciowe koncentruje się na napięciach, kontrola prądu jest nadal istotna. Prądy $i_A(t)$ i $i_B(t)$ powinny być kształtowane w taki sposób, aby generować moment zgodny z wymaganiami aplikacji. W praktyce oznacza to modulację napięcia w celu uzyskania odpowiednich przebiegów prądu.

Implementacja w sterownikach

Nowoczesne sterowniki, takie jak L6470 od STMicroelectronics, implementują opisaną teorię sterowania napięciowego. Wykorzystują one zaawansowane algorytmy do obliczania wymaganego napięcia dla każdej fazy, uwzględniając BEMF oraz indukcyjność uzwojeń. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie płynnego i precyzyjnego ruchu silnika.

Wnioski

Sterowanie napięciowe silników krokowych, z uwzględnieniem BEMF i indukcyjności, pozwala na bardziej efektywne i ciche sterowanie w porównaniu z tradycyjnymi metodami opartymi na kontroli prądu. Implementacja tej metody w nowoczesnych sterownikach umożliwia precyzyjne pozycjonowanie i kontrolę prędkości w różnych aplikacjach.