

SÖVÉNYVÁGÓ BLDC MOTORJÁNAK DINAMIKAI MODELLJE

DINAMIC MODEL OF THE BLDC MOTOR USED IN HEDGE TRIMMERS

Siktár Bálint*, Dr. Hegedűs György**, Dr. Kakuk József***

ABSTRACT

Hedge trimmers are electric power tools, there are both alternating (AC) and direct current (DC) powered products available on the market. The DC motor variants have two subtypes, conventional DC motors, where the commutation happens using brushes, and brushless DC (BLDC) motors, where the commutation happens using electric commutation instead of commutation with brushes. This paper aims to introduce the grounds of the dynamic model of a BLDC motor.

1. BEVEZETÉS

A kefenélküli (*Brushless*) egyenáramú motorok két fő komponensből állnak, ezek a forgórész (rotor) és az állórész (stator) [1]. A BLDC motorok lehetnek egy, kettő vagy háromfázisú kivitelűek is. Az állórészen található a réz tekercselések, ezekből általában 3 db vagy a 3 egészszámu többszöröse található. A forgórészben található a motor tengelye, e tengely segítségével hasznosítható a motor teljesítménye. A tengelyre vannak préselve az állórész lamellái, a lamellákban található a BLDC motor permanens mágnesei. A forgórész pólus párijainak száma kettő és nyolc között változhat.

A BLDC motorok lehetnek belső vagy külső forgórésűek. Külső forgórész esetén a forgórész az állórész körül helyezkedik el, ebben az esetben a forgórész gyűrű alakú. Belső forgórész esetén a forgórész az állórész belsejében található.

Az akkumulátoros kéziszerszámokban a kezdetekben DC motorokat használtak. Ennek oka, hogy alkalmazásuk alacsonyabb költséget jelent, a vezérlő elektronika sem szükséges, hogy komplex legyen, illetve egyes alkalmazások megoldhatók még észszerű méretű keféss DC motorokkal. Napjainkban egyre gyakrabban kerülnek BLDC motorok beépítésre akkumulátoros szerszámokba, ennek több oka van. A BLDC motor bár költségesebb, de élettartam tekintetében csak a forgórész csapágynak élettartama szab korlátot. Bár a BLDC motorok vezérlése összetettebb feladat – tekintettel a három fázis megfelelő működtetéséhez szükséges fázisonkénti 2 MOSFET-re – a vezérléssel pontosabb működés érhető el. A BLDC motorok nagy előnye még a

hagyományos DC motorokkal szemben az azonos teljesítmény biztosításához szükséges kisebb méret [1]. E tulajdonságaik miatt napjainkban szinte kizárólag BLDC motorokat használnak az akkumulátoros kézi szerszámokban.

A BLDC motor viselkedésének megfelelő szintű elemzéséhez szükség van a BLDC motor dinamikai viselkedését leíró egyenletek meghatározására, előállítására.

2. BLDC motor dinamikai egyenletrendszerének származtatása

A BLDC motor dinamikai viselkedése az

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

egyenletrendszerrel írható le [2], ahol az u_{as} , u_{bs} és u_{cs} [V] az állórész tekercseinek fázisfeszültségei, R_s az állórész fázisonkénti ellenállása [Ω], i_a , i_b és i_c [A] az állórész fázisainak áramerősségei, L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} a tekercsek öninduktivitásai [H], $L_{ab}=L_{ba}$, $L_{ac}=L_{ca}$ és $L_{bc}=L_{cb}$ az a , b és c fázis közötti kölcsönös induktivitások [H], az e_a , e_b és e_c pedig a fázisonkénti elektromotoros erők [V]. A rotor üreges kialakítása miatt – a hagyományos DC rotor hornyos kialakításával szemben – a rotor induktivitását konstansnak lehet venni a rotor szögének függvényében, így kapjuk az

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L, \quad (2)$$

és

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = L_k \quad (3)$$

összefüggéseket.

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

** Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

*** Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

A (2) és (3) összefüggések (1) egyenletbe történő behelyettesítését követően kapjuk az

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & L_k & L_k \\ L_k & L & L_k \\ L_k & L_k & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

permanens mágnesű kefenélküli DC motor modelljének egyenletét. Új változóként szükséges bevezetni az u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} és u_{n0} feszültségeket, melyek a DC összeköttetés középső pontjának nulla referenciapotenciáljához vonatkoztatott háromfázisú és semleges feszültségek. A fázisfeszültségek az új változók felhasználásával az

$$u_{as} = u_{a0} - u_{n0} \quad (5)$$

$$u_{bs} = u_{b0} - u_{n0} \quad (6)$$

$$u_{cs} = u_{c0} - u_{n0} \quad (7)$$

összefüggésekkel származtathatók. A stator állórészének áramaira az

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (8)$$

kényszeregyenlet használható fel. A (8) kényszeregyenlet alapján a kölcsönös induktivitásokra az

$$i_b L_k + i_c L_k = -i_a L_k \quad (9)$$

kapcsolat írható fel, mellyel a modell induktivitásai egyszerűsíthetők. Az egyszerűsítés után (4) összefüggés az

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - L_k & 0 & 0 \\ 0 & L - L_k & 0 \\ 0 & 0 & L - L_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

alakot veszi fel. Az e_a , e_b és e_c elektromotoros erőkről kijelenthető, hogy karakterisztikájuk trapéz hullám alakú, ez alapján változásuk a

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega_m \lambda_m \begin{bmatrix} f_{as}(\varphi_r) \\ f_{bs}(\varphi_r) \\ f_{cs}(\varphi_r) \end{bmatrix} \quad (11)$$

összefüggéssel írható fel, ahol ω_m a rotor szögsebessége [rad/s], λ_m a kapcsolt fluxus [Wb], φ_r a rotor pozíciójának [rad] jelölésére szolgál. A (11) egyenletben jelölt $f_{as}(\varphi_r)$, $f_{bs}(\varphi_r)$ és $f_{cs}(\varphi_r)$ függvények alakja megegyezik a függvények alakjával, szélsőértékeik ± 1 . A létrejött elektromotoros erők nem rendelkeznek éles átmenetekkel a trapéz alakú természetükből adódóan. Az elektromotoros erők a kapcsolt fluxus deriváltjaiból adódnak, a kapcsolt fluxus pedig folytonos függvény. A peremhatás (*fringing*) miatt a fluxussűrűség függvény sima, hirtelen átmenetek nélküli lesz. Newton törvénye alapján az elektromágneses nyomaték az

$$M_{em} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (12)$$

alakban írható le. A tehetetlenségi nyomaték a

$$J = J_m + J_l \quad (13)$$

összefüggéssel jellemezhető, ahol J_m a rotor tehetetlenségi nyomatékát [kgm²], J_l a terhelésből adódó tehetetlenségi nyomatékot [kgm²] jelöli. Az egyszerű mozgó rendszer a

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + b\omega_m = M_{em} - M_l \quad (14)$$

formulával jellemezhető, ahol a b a motor légellenállási tényezője [Nms], M_l pedig a terhelő nyomaték [Nm]. A rotor pozíciója és a szögsebesség között a

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{p}{2} \omega_m \quad (15)$$

kapcsolat áll fenn, ahol p a pólusok számát jelöli. A b súrlódási légellenállási tényező gyakran alacsony, ezért figyelmen kívül hagyható a rendszer vizsgálata közben. A (15) egyenletben összefoglaltak a rotor helyzetének (φ_r) változását írják le, mely 2π periódusonként ismétlődik. A semleges pont potenciálját a nulla potenciálhoz viszonyítva (v_{n0}) figyelembe kell venni azért, hogy a rendszer feszültségének kiegyensúlyozatlanságának megelőzése és a hajtás teljesítményének szimulálása megvalósulhasson. Ezt úgy érjük el, hogy (8) összefüggést behelyettesítjük (10) egyenletbe, majd összeadjuk a mátrix egyenletrendszer egyenleteit, kapjuk a

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} - 3v_{n0} = R_s (i_a + i_b + i_c) + (L - L_k)(p i_a + p i_b + p i_c) + (e_a + e_b + e_c) \quad (16)$$

egyenletet.

Behelyettesítve a (8) összefüggést a (14) egyenletbe a

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} - 3v_{n0} = (e_a + e_b + e_c) \quad (17)$$

összefüggés adódik, melyet rendezve kapjuk a

$$v_{n0} = \frac{(e_a + e_b + e_c) - (v_{a0} + v_{b0} + v_{c0})}{3} \quad (18)$$

formulát. A (10), (14) és (15) differenciálegyenletek definiálják a dinamikai modellt az i_a , i_b , i_c , ω_m stacionárius és φ_r instacionárius változók függvényében. A rendszer állapotter alakja az

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{C}\mathbf{e} \quad (19)$$

egyenlettel írható le, ahol

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L-L_k} & 0 & 0 & -\frac{\lambda_m}{J}f_{as}(\varphi_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L-L_k} & 0 & -\frac{\lambda_m}{J}f_{bs}(\varphi_r) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L-L_k} & -\frac{\lambda_m}{J}f_{cs}(\varphi_r) & 0 \\ \frac{\lambda_m}{J}f_{as}(\varphi_r) & \frac{\lambda_m}{J}f_{bs}(\varphi_r) & \frac{\lambda_m}{J}f_{cs}(\varphi_r) & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-L_k} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{x} = [i_a \ i_b \ i_c \ \omega_m \ \varphi_r]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{u} = [u_{as} \ u_{bs} \ u_{cs} \ M_l]^T \quad (24)$$

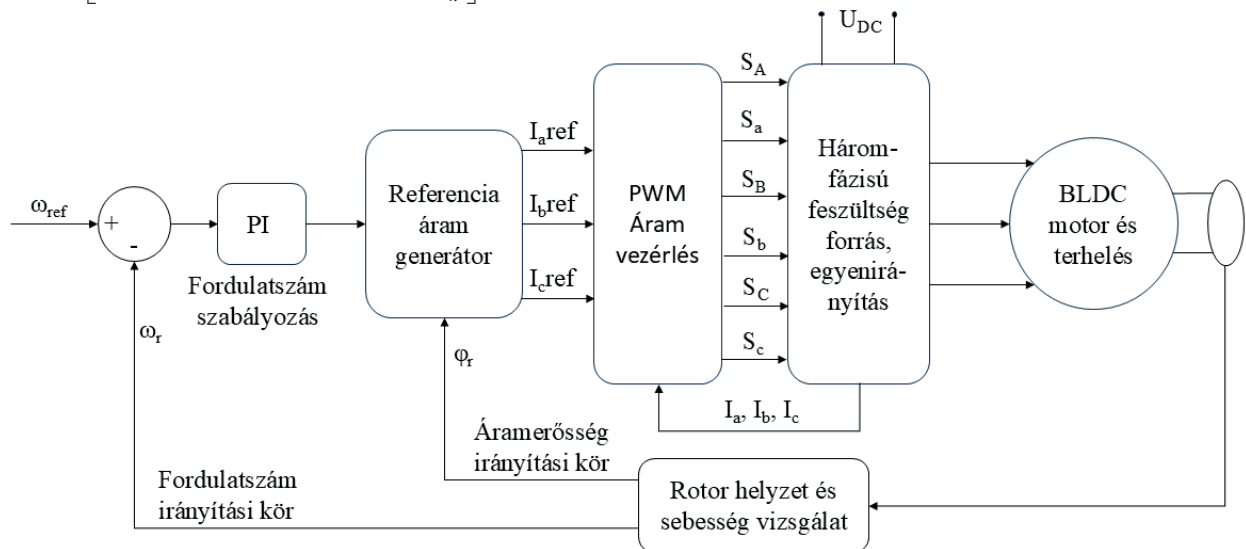
$$\mathbf{e} = [e_a \ e_b \ e_c]^T \quad (25)$$

3. BLDC motor vezérlésének blokkdiagramja

Az 1. ábrán egy zárt irányítású BLDC motor blokk diagramja [3] látható [3]. Az ábrán jelölve van 2 vezérlési kör is, az egyik a fordulatszám szabályozásért, a másik az áramfogyasztás irányításáért felelős. Az ábrán láthatók a korábban már ismertett konstansok, illetve változók. Megfigyelhető, hogy a vezérlés folyamatosan felügyeli a BLDC motor három fázisának áramfelvételét és ez alapján változtatja a PWM (*Pulse Width Modulation* – impulzus szélesség moduláció) kitöltési tényezőjét, szintén egy zárt vezérlési körben megvalósítva.

A PWM-mel történő vezérlés esetén a BLDC motor három jellemzője alapján történhet a vezérlés, ezek a nyomaték, a fordulatszám, illetve a rotor pozíciója [4].

Nyomaték alapú vezérlés esetén a fázisáramokat egy ekvivalens egyenáramú (DC-link) áramértékké alakítják. Ezt az értéket kivonják egy referenciaértékből, amelyet a nyomaték referenciaértékéből számítanak.

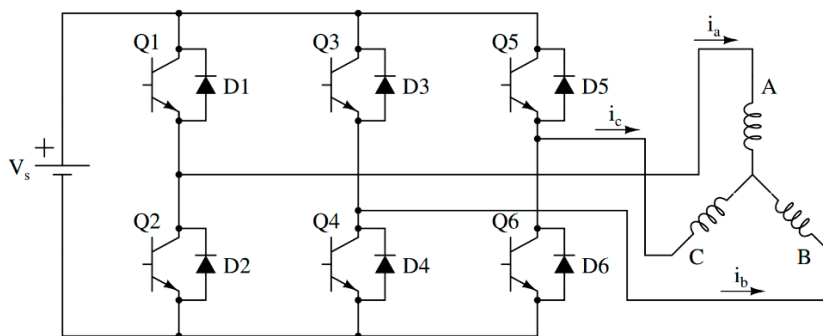


1. ábra A BLDC motor zárt irányítási blokk diagramja [3]

Az áramhibát egy áramvezérlőhöz továbbítják, amelynek kimenetét egy trapéz hullámformával hasonlítják össze. Az összehasonlító kimenete egy magas vagy alacsony szintű jel, amely az inverter számára vágójelként szolgál. A fordulatszám alapú vezérlés esetén az áramvezérlő ugyanaz, mint korábban, de egy PI-szabályozót is hozzáadtak. A sebességszabályozó paramétereit hasonló elvek alapján határozzák meg, mint az áramvezérlő paramétereit. A pozíciószabályozó esetén is egy PI-szabályozó kerül beépítésre, viszont ez nem lehet túl nagy sebességű, mert ha túllövés következik be, az egyetlen módja a referencia szöghez való közelítésnek a rotor fordított irányú mozgása lenne. Mivel a BLDC

motor nem támogatja a visszafordítást, a szabályozót szándékosan lassúra tervezték a túllövés elkerülése érdekében.

A BLDC motor egyenirányítása napjainkban MOSFET-ek alkalmazásával történik [5]. A MOSFET mozaikszó jelentése *Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor*, vagyis fém-oxid-félvezető térvezérlésű tranzisztor. A BLDC motor egyszerűsített villamos kapcsolása a 0. ábrán látható, itt MOSFET-ek helyett BJT-k (*bipolar junction transistor* – bipoláris csomópont tranzisztor) vannak elhelyezve.



2. ábra A BLDC motor egyszerűsített kapcsolása [4]

A BLDC motorok vezérlése a PWM vezérlésen kívül történhet még hiszterézis sáv alapú szabályozással (*hysteresis band control*) vagy változó egyenáramú közbensőköri feszültségvezérléssel. A hiszterézis sáv alapú szabályozás azt jelenti, hogy a szabályozott változó értékét egy meghatározott tartományon (hiszterézis sávon) belül tartják a referenciaérték körül. Ennek a módszernek az alkalmazása esetén a motort kikapcsolják, ha a sebesség egy bizonyos szinttel meghaladja a referencia sebességet, és újra bekapcsolják, amikor a sebesség egy bizonyos szint alá csökken a referenciaértékhez képest. A változó egyenáramú közbensőköri feszültségvezérlés esetében egy változtatható egyenfeszültségű tápegységet használnak a rákapcsolt feszültség szabályozására. Ez a módszer bizonyos előnyöket kínálhat a korábban említett két módszerhez képest. A lineáris jellegű szabályozás olcsóbb, mint az impulzus jellegű vezérlés (PWM), azonban alacsony feszültség és nagy áram esetén a veszteségek jelentősek lehetnek.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A publikációban ismertetésre került a BLDC motorok késziszerszámokban történő alkalmazásának háttere, ismertetésre került továbbá, hogyan hasonlíthatók össze a BLDC és hagyományos DC motorok. A tanulmányban levezetésre került a BLDC motor dinamikai modellje, bemutatásra került a BLDC motor vezérlésére képes zárt irányítási blokk diagram. Ismertetésre került, milyen vezérlési stratégiák érhetőek el a BLDC motor PWM-mel történő vezérlése esetén.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A C2263193 számú projekt a kulturális és innovációs minisztérium nemzeti kutatási fejlesztési és innovációs alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

6. IRODALOM

- [1] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Microchip Technology Inc., 2004
- [2] S. Rambabu, *Modeling and control of a brushless DC motor*, National Institute of Technology, India, 2007
- [3] M. Poovizhi, M. Senthil Kumaran, P. Ragul, L. Irene Priyadarshini, R. Logambal, *Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor (BLDC) drives by using matlab-simulink*, 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC) <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081083>
- [4] S. Baldursson, *BLDC Motor Modelling and Control – A MATLAB/Simulink Implementation*, Svédország, 2005
- [5] W. Brown, *Brushless DC Motor Control Made Easy*, Microchip Technology Inc., 2002