

## **BLDC (State of Art)**

Bezuhlíkové (bezkeťové) jednosmerné motory často označované anglickou skratkou BLDC patria medzi moderné elektrické pohony, ktoré sa vyznačujú vysokou účinnosťou a spoľahlivou prevádzkou. Elektronická komutácia im umožňuje presné riadenie otáčok a momentu, čo ich robí ideálnymi pre široké spektrum priemyselných aplikácií. Ich popularita neustále rastie, keďže poskytujú lepší výkon a nižšie nároky na údržbu v porovnaní s tradičnými motormi. Okrem toho ponúkajú kompaktnú konštrukciu a dlhú životnosť, čo ešte viac zvyšuje ich atraktivitu v moderných aplikáciách ako napríklad v automobilovom priemysle.

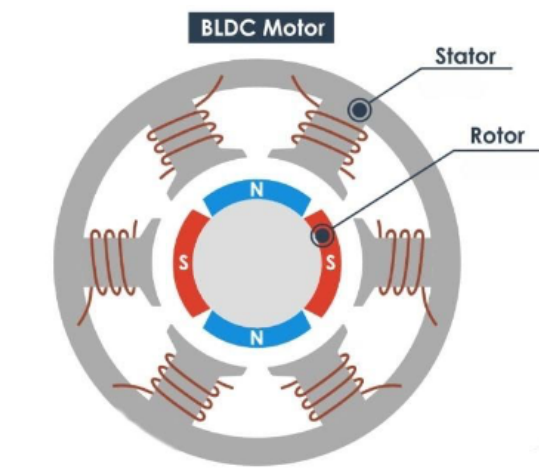
Očakáva sa, že do roku 2030 sa BLDC motory stanú dominantným riešením prenosu výkonu v priemysle a postupne nahradia tradičné asynchrónne motory. Napriek rastúcemu záujmu o ich priemyselné a komerčné využitie však budúcnosť BLDC motorov sprevádzajú viaceré zásadné výzvy či nedostatky. Z hľadiska spoľahlivosti a životnosti BLDC motory stále nedosahujú dostatočnú úroveň odolnosti voči poruchám, nedokážu výrazne znížiť elektromagnetické rušenie, akustický hluk, vztlak magnetického toku ani vztlak momentu. Ako perspektívne riešenie týchto nedostatkov sa javí napríklad vektorové riadenie v uzavretej slučke.

V dostupnej literatúre sa za posledné roky objavilo len obmedzené množstvo prehľadových štúdií zameraných na návrh a riadenie BLDC motorov. Navyše, kľúčové problémy, ako porovnanie existujúcich vektorových riadiacich metód, zlepšenie odolnosti voči poruchám, znížovanie elektromagnetického rušenia či ďalšie technické otázky zostávajú často nepokryté.

V posledných desaťročiach sa BLDC motory stali predmetom intenzívneho výskumu, najmä v súvislosti s rozvojom elektromobility v automobilovom priemysle. Pre rastúci dopyt po elektrických vozidlách bude význam BLDC motorov ešte výraznejší. Globálny trh s BLDC motormi by mal podľa odhadov narásť z približne 9,6 miliardy USD v roku 2020 na 15,2 miliardy USD v roku 2025.

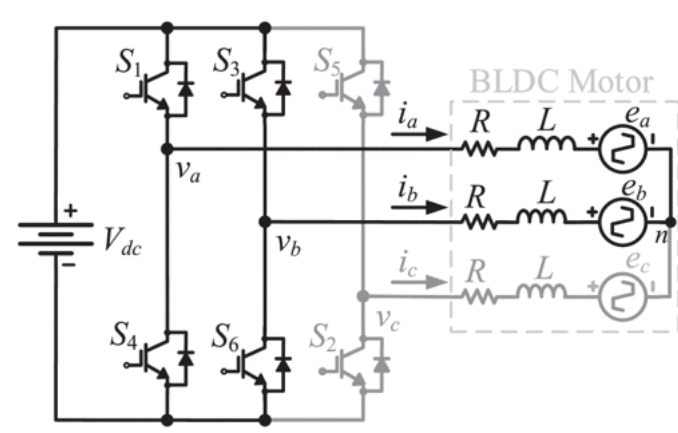
## Princíp činnosti

BLDC motor pracuje na základe elektronickej komutácie, ktorá nahrádza mechanické kefy používané v klasických DC motoroch. Rotor obsahuje permanentné magnety, zatiaľ čo stator je tvorený viacfázovým vinutím, do ktorého sa privádza riadený prúd. Elektronický menič (invertor) postupne prepína napájanie jednotlivých fáz statora tak, aby vytváral otáčajúce sa magnetické pole. Toto pole pôsobí na permanentné magnety rotora podľa Lorentzovej sily, čím vzniká rotačný pohyb. Na správne načasovanie komutácie sa používajú snímače polohy rotora (napr. Hallove sondy) alebo algoritmy bezsnímačového riadenia, ktoré polohu odhadujú z napäťových a prúdových signálov. Na dosiahnutie efektívnej prevádzky je potrebné presné riadenie prúdu v jednotlivých fázach tak, aby bol magnetický tok statora vždy v optimálnom uhle voči magnetom statora.



Obr. 1: Konštrukcia BLDC motora

BLDC motory vytvárajú stacionárny magnetický tok medzi rotorom a statorom, čo im umožňuje pracovať s účinníkom blízky jednej. Napájané sú elektronicke komutovanými meničmi a každá fáza je riadená v uzavretej regulačnej slučke. Úlohou tejto slučky je dodávať do vinutí presne tvarované prúdové impulzy, aby bolo možné riadiť otáčky aj moment, ktoré sú v motore vzájomne previazané javy. BLDC motor je riadený s vysokou presnosťou, čo však pri zaťažených prevádzkových podmienkach môže viesť k zvýšenému mechanickému opotrebovaniu.



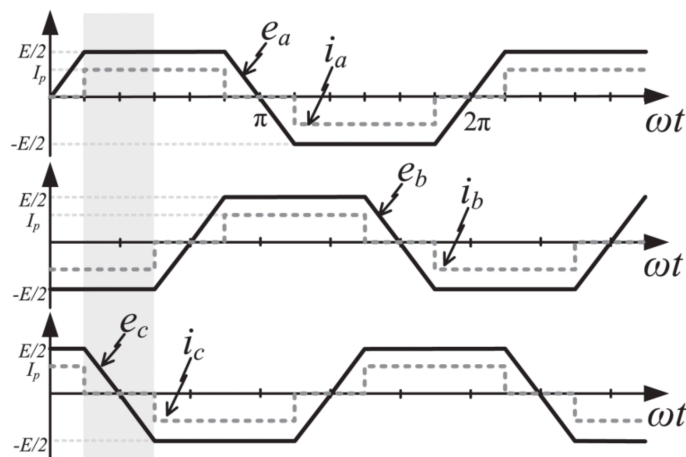
Obr. 2: Zjednodušená schéma trojfázovej VSI topológie

Na obr. 2 je vyobrazená základná schéma trojfázovej topológie typu VSI (Voltage Source Inverter) pre BLDC motor. VSI je napäťový striedač (invertor), ktorý vytvára trojfázové napätie pomocou mostíkového zapojenia výkonových tranzistorov, najčastejšie MOSFET alebo IGBT. Odpor

a indukčnosť fázového vinutia je znázornená prvkami R a L. Spätné elektromotorické napätie (b-EMF) reprezentuje trojica napäťových zdrojov.

Ideálne priebehy spätného elektromotorického napätia a prúdu v jednotlivých fázach sú znázornené na obr. 3. Môžeme vidieť, že b-EMF má tvar lichobežníka, zatiaľ čo prúd vo fázach má takmer obdĺžnikový priebeh. Táto kombinácia zvyšuje hustotu výkonu a moment približne o 15 % pri rovnakej úrovni prúdu a zároveň eliminuje pulzujúci moment na hriadeli. Vďaka tomu sú BLDC motory vhodné nielen pre malé elektromobily, ale aj jednoduchšie z hľadiska umiestnenia snímačov polohy v statore. Tento benefit vyplýva zo skutočnosti, že je potrebné rozlišovať iba šesť rôznych polôh rotora.

V dôsledku tvaru prúdu vedú v každom okamihu iba dve fázy, ako je znázornené na obr. 3. Keďže počas každého intervalu ( $\pi/3$ ) prúd preteká vždy len dvoma fázami motora, nie je potrebné navrhovať tri samostatné prúdové regulátory, ale postačuje jeden. Inými slovami, riadiť treba iba príslušný (nasledujúci) fázový prúd. Na základe tejto vlastnosti je možné VSI riadiť ako plný mostík, čo umožňuje použiť unipolárny PWM vzor. Veľkou výhodou je, že výstupné napätie sa prepína frekvenciou, ktorá je dvojnásobkom spínacej frekvencie jednotlivých tranzistorov.



Obr. 3: Priebehy spätného elektromotorického napätia a prúdov

Elektrický motor vytvára krútiaci moment tým, že udržiava magnetické polia rotora a statora (nepohyblivej časti) v neustálej nezhode. Jedna alebo obe skupiny magnetov sú elektromagnety, teda cievky vodiča navinuté okolo železného jadra. Prechod jednosmerného prúdu cez vinutie vytvára magnetické pole, ktoré motor poháňa. Práve nesúlad medzi poľami spôsobuje vznik krútiaceho momentu, ktorý sa ich snaží zosúladiť. Keď sa rotor otáča a polia sa začnú zosúlaďovať, je potrebné posunúť magnetické pole rotora alebo statora tak, aby nesúlad pretrvával a motor mohol ďalej vytvárať krútiaci moment a pohyb. Zariadenie, ktoré podľa polohy rotora prepína a posúva magnetické polia, sa nazýva komutátor. Ako už bolo spomenuté vyššie, v BLDC motoroch je mechanický komutátor nahradený elektronickým riadiacim obvodom. Keďže tu nedochádza ku kľzavému kontaktu medzi kefami a komutátorom, BLDC motory majú nižšie trenie a dlhšiu životnosť, ich prevádzková životnosť je obmedzená prakticky len životnosťou ložísk.

## Typy riadenia a topológie meničov

Riadenie BLDC motorov je možné realizovať tromi základnými spôsobmi. Najjednoduchšie je trapezoidálne (lichobežníkové) riadenie, pri ktorom sa fázy prepínajú v šiestich krokoch, čo je lacné a rýchle, no menej plynulé. Pokročilejšie je sínusové riadenie, ktoré vytvára hladší priebeh prúdu a zabezpečuje tichší chod motora. Najpresnejšou a najefektívnejšou metódou je FOC (Field Oriented Control), ktoré riadi magnetický tok a krútiaci moment nezávisle od seba a poskytuje maximálnu účinnosť aj plynulosť. Na rozdiel od FOC prvé dva typy riadenia nevyžadujú žiadne zložité výpočty v reálnom čase a stačí prepínať tranzistory podľa polohy rotora.

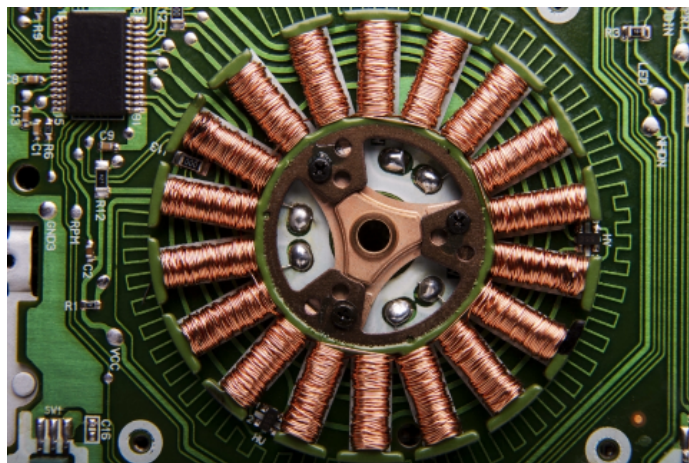
Topológie výkonových meničov pre BLDC motory určujú, ako je zostavený výkonový stupeň, ktorý premieňa jednosmerné napätie na striedavé napätie potrebné pre motor. Najčastejšie sa používa napäťový striedač VSI, ktorý je napájaný zo zdroja s pevne daným napätím a pomocou trojfázového mostíka z tranzistorov MOSFET alebo IGBT vytvára požadované spínané napätie. Alternatívou je prúdový striedač CSI (Current Source Inverter), ktorý namiesto napätia pracuje s konštantným prúdom, avšak pri BLDC motoroch sa prakticky nevyužíva. Pri menších alebo jednoduchších motoroch sa môžu použiť jednofázové či dvojfázové meniče, prípadne polovičné mostíky, ktoré znižujú počet potrebných výkonových prvkov. V náročnejších aplikáciách sa výkonový stupeň dopĺňa o DC/DC menič, napríklad buck alebo boost, ktorý upravuje napätie pred samotným invertorom, zvyšuje účinnosť a umožňuje funkcie ako rekuperácia.

## Aplikácie

BLDC motory sa používajú v širokom spektre aplikácii vďaka svojej vysokej účinnosti, spoľahlivosti a tichému chodu. V priemyselnej automatizácii poháňajú servopohony, robotické ramená, CNC stroje či rôzne čerpadlá a kompresory. V automobilovom priemysle sa uplatňujú v elektrických a hybridných vozidlách, kde slúžia ako trakčné motory, ale aj v systémoch ako ABS, elektrickom posilňovači riadenia, zdvíhačoch okien či klimatizácii. BLDC motory sa uplatňujú taktiež vo výpočtovej technike, predovšetkým v pevných diskoch (HDD) a chladiacich ventilátoroch, kde zabezpečujú presne riadené a stabilné otáčky nevyhnutné pre spoľahlivú prevádzku zariadení. Vo vojenskej technike sa často využívajú ako pohonné jednotky bezpilotných lietadlových systémov. Uplatnenie nachádzajú aj v zdravotníckych a laboratórnych prístrojoch, kde poháňajú malé pumpy, ventilátory či kompresory využívané v rôznych podporných a analytických systémoch.

## Konštrukcia a materiály

Konštrukcia BLDC motorov vychádza z točivých synchronných strojov s permanentnými magnetmi, pričom jednotlivé časti motora sú navrhnuté tak, aby poskytovali vysokú účinnosť, nízke straty a dlhú životnosť. Stator je tvorený laminovaným jadrom z elektrotechnickej ocele, ktoré minimalizuje vírivé prúdy a vinutiami, ktoré sú realizované buď ako koncentrované, alebo rozložené, čo ovplyvňuje momentové zvlnenie, hlučnosť aj celkovú účinnosť motora. Rotor obsahuje permanentné magnety z materiálov, ako sú ferit, NdFeB alebo SmCo, pričom výber magnetu určuje hustotu výkonu, teplotnú odolnosť a cenu motora. Magnety môžu byť umiestnené na povrchu rotora alebo zapustené do jeho vnútra, čo ovplyvňuje mechanickú pevnosť aj charakter momentu. Mechanické časti motora dopĺňajú ložiská, ktoré sú často jediným prvkom podliehajúcim opotrebeniu. Používajú sa najmä guľôčkové alebo keramické ložiská, prípadne magnetické ložiská v aplikáciách s extrémne vysokými otáčkami. Celkovú spoľahlivosť a výkon motora výrazne ovplyvňuje aj tepelný manažment, pretože vinutia bývajú impregnované izolačnými materiálmi pre lepšiu odvod tepla a kryt motora je často navrhnutý tak, aby zároveň slúžil ako chladiaci prvok.



Obr. 4: Fyzická reprezentácia statora BLDC v pevnom disku

## Referencie

D. Mohanraj et al., "A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications," in IEEE Access, vol. 10, pp. 54833-54869, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.

Y. Lee and S. Makonin, "Descriptor: BLDC Hall Sensor Displacement Dataset (BLDC-HSD)," in IEEE Data Descriptions, vol. 1, pp. 22-26, 2024, doi: 10.1109/IEEEDATA.2024.3475993.

R. L. Valle, P. M. De Almeida, G. A. Fogli, A. A. Ferreira and P. G. Barbosa, "Simple and Effective Digital Control of a Variable-Speed Low Inductance BLDC Motor Drive," in IEEE Access, vol. 8, pp. 13240-13250, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966437.

<https://www.brushless.com/brushless-dc-motor-vs-hub-motor>