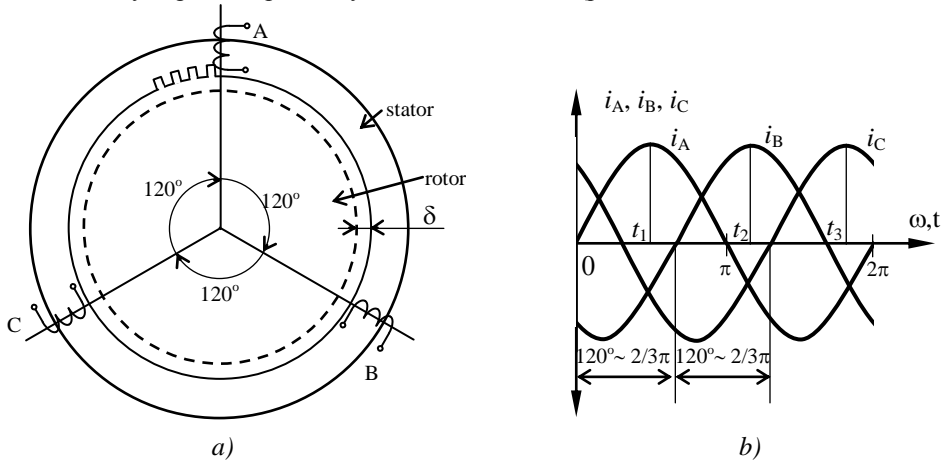


3.2 Vinutia striedavých strojov

3.2.1 Základné pojmy

Striedavé točivé elektrické stroje pracujú na princípe točivého magnetického poľa, ktoré vzniká vo vnútri dutého valcového statora, ak trojfázové rozložené vinutie, posunuté po vnútornom obvode statora o 120° el., je napájané trojfázovou sústavou symetrických harmonických prúdov, posunutých v čase o 120° el. (pozri obr. 3.2.1a,b).



Obr. 3.2.1 a) Ilustračný obrázok trojfázového rozloženého vinutia posunutého v priestore o 120° el. v dvojpólovom stroji, b) trojfázová sústava symetrických harmonických prúdov, posunutých o 120° el.

Táto definícia platí pre trojfázové vinutia, ktoré sa najčastejšie používajú, treba však povedať, že všeobecnejšie formulovaná definícia by mala byť pre viacfázové vinutia a viacfázový prúd. Počet fáz sa označuje m . V tejto kapitole sa budeme venovať teórii viacfázového (trojfázového) vinutia. Základné pojmy striedavého vinutia ostávajú rovnaké ako pre jednosmerné vinutie kotvy, niektoré sú však nové, ktoré vysvetlíme tu:

m - počet fáz

Q - počet drážok po obvode stroja

$2p$ - počet pólov

$$Q_p \text{ - počet drážok na pól } Q_p = \frac{Q}{2p} \approx \tau_p \approx Y$$

kde Y je rozpätie cievky vyjadrené počtom drážok, čiže drážkový krok. Ak $Y = \tau_p = Q_p$, cievka má plný krok, čiže jej rozpätie je zhodné s pólovým rozstupom $\tau_p = \frac{\pi d}{2p}$. Ak

$Y < Q_p$ ide o skráteneý krok, ktorý sa používa v dvojrvtvových vinutiach na zlepšenie tvaru krivky indukovaného napätia. Je tiež možné vytvoriť predĺžený krok, ak $Y > Q_p$.

$\frac{Q}{m}$ - počet drážok na fázu

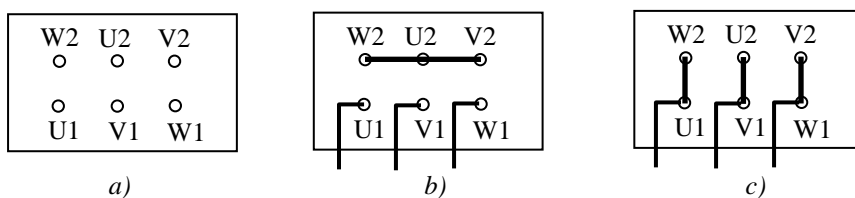
$q = \frac{Q}{2pm}$ - počet drážok na pól a fázu, ktorý môže byť celé číslo, alebo zlomok (potom sa vinutie volá zlomkové)

N - počet závitov jednej fázy

$2N$ - počet vodičov jednej fázy

$$z_Q = \frac{2N}{\frac{Q}{m}} = \frac{2mN}{Q} = \frac{N}{pq} - \text{počet vodičov v drážke}$$

Tento vzťah je veľmi užitočný, lebo keď je známy počet vodičov v drážke, je možné vypočítať počet závitov jednej fázy vinutia. Základný rozdiel medzi jednosmerným a striedavým vinutím je ten, že jednosmerné vinutie kotvy je uzavreté, nemá začiatok, ani koniec, pretože začiatok cievky je pripojený na lamelu komutátora a koniec cievky na ďalšiu lamelu komutátora vzdialenú o komutátorový krok, kde začína ďalšia cievka, a tak dookola celej kotvy a komutátora (pozri kap. 3.1.1). Striedavé vinutie tvoria jednotlivé vinutia fáz (vinutie fázy tvoria cievky, zapojené do série), ktoré svojim začiatkom sú pripojené na jednu svorku na svorkovnici a koniec je vyvedený na druhú svorku svorkovnice. Pri trojfázovom vinutí tak vznikne šesť svoriek (podľa EN STN ich označenie je U1, U2, V1, V2, W1, W2), prepojením ktorých vznikne zapojenie do hviezdy, alebo trojuholníka (pozri obr. 3.2.2a,b,c). Napriek takto zavedenému značeniu fáz ostaneme pri staršom a jednoduchšom označovaní fáz A, B, C (opačná polarita -A, -B, -C). Tak sa vyhneme zdvojenému používaniu písmena U na napätie aj na označenie jednej z fáz.



Obr. 3.2.2 a) Svorkovnica trojfázového stroja s označením svoriek, b) zapojenie do hviezdy, c) zapojenie do trojuholníka

3.2.2 Návrh striedavého vinutia

Skôr ako uvedieme konkrétne príklady návrhu najjednoduchších striedavých vinutí, treba pripomenúť, že budeme používať tie isté pojmy a definície ako pre jednosmerné vinutie, t. j. fázorový diagram s určitým počtom fázorov indukovaných napätí, vzájomne posunutých o uhol dvoch susedných lúčov α_p a znázorňujúcich indukované napätia v dvoch susedných drážkach vzájomne posunutých o uhol α_d .

Opäť predpokladáme, že fázor napätí všetkých vodičov v drážke je ten istý. Každý drážke patrí v určitom okamžiku určitý smer fázora. Ak označíme počet fázorov potrebných na zhotovenie fázorového diagramu F , definujeme jednak elektrický uhol dvoch susedných fázorov v diagrame:

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{F}$$

a jednak elektrický uhol napätí dvoch susedných drážok (po obvodu kotvy je $p360^\circ$ elektrických):

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q}$$

Na určenie počtu fázorov opäť použijeme tie isté vzťahy ako v jednosmernom vinutí:

Ak má Q a p najvyššieho spoločného deliteľa t , počet fázorov je: $F = \frac{Q}{t}$,

uhol dvoch susedných fázorov je

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{F} = \frac{360^\circ}{Q} t,$$

a uhol dvoch susedných drážok

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q} = \frac{p}{t} \alpha_p$$

Ak je q celé číslo, tak $p = tq$ a $\alpha_d = \alpha_p$. Teraz sa budeme zaoberať len takými vinutiami, kde q je celé číslo. Je však pravda, že v mnohopólových synchronných generátoroch, ktoré majú dodávať harmonické (sínusové) napätie, sa používajú zlomkové vinutia.

Na niekoľkých jednoduchých príkladoch pomocou grafickej interpretácie vysvetlíme princíp vzniku točivého magnetického poľa a sčítavania napätia indukovaného v drážkach do celkového napätia jednej fázy.

Príklad 1

Navrhните najjednoduchšie trojfázové vinutie, zistíte smer magnetického poľa v okamihoch, v ktorých prúdy jednotlivých fáz nadobúdajú maximum, nakreslite fázorový diagram a nakreslite fázové napätia jednotlivých fáz.

Riešenie:

Najmenší počet drážok, s ktorým možno vytvoriť trojfázové vinutie dostaneme pre dvojpólový stroj, ak $q = 1$. To znamená $m = 3, 2p = 2, q = 1 \Rightarrow Q = 2pmq = 2 \cdot 3 \cdot 1 = 6$, t. j. na najjednoduchšie trojfázové vinutie treba 6 drážok, ktoré rozmiestnime po obvodovú vŕtania statora (čiže po vnútornom obvode statora). Na obr. 3.2.3 a) je priečny rez takéhoto statora aj so smermi prúdov pri trojfázovom napájaní. Umiestnenie fáz v jednotlivých drážkach a smery prúdov určíme takto:

V okamihu t_1 (obr. 3.2.1b) nadobúda A fáza svoje maximum, B a C fáza polovičné hodnoty maxima opačnej polarity. Ak označíme krížikom kladnú polaritu prúdu vo fáze A a uložíme ju do drážky č.1, tak o pólový rozstup, čiže o počet drážok na pól $Q_p = Q/2p = 6/2 = 3$ sa vrátíme drážkou č. 4 opačnou polaritou -A a smer prúdu označíme bodkou. Fázu B umiestnime o 120° v smere hodinových ručičiek od fázy A, čiže do drážky č. 3, polaritu prúdu označíme bodkou, pretože v okamihu t_1 je prúd vo fáze B záporný a vrátíme sa drážkou č.6 s kladnou polaritou prúdu, označenej krížikom. Fázu C vložíme o ďalších 120° ďalej od fázy B, t. j. do drážky č.5 opäť so zápornou polaritou prúdu a vrátíme sa drážkou č. 2 s kladnou polaritou prúdu. Tým sme po obvode vytvorili kvázi-cievku a pravidlom pravej ruky určíme smer magnetického toku, ktorý je vyznačený na obr. 3.2.3b). Vidíme, že tvar magnetického poľa je taký ako v dvojpólovom jednosmernom stroji, s tým rozdielom, že tu nie sú žiadne vyjadrené póly. Magnetické póly sme vytvorili rozmiestnením prúdov v drážkach po obvode hladkého dutého valca (po obvode vŕtania statora).

Ak sa sústredíme len na rozmiestnenie fáz do drážok, tak konštatujeme, že fáza +A je v drážke č.1, -A v č. 4, fáza +B je od +A posunutá o 120° , takže +B je v č. 3 a -B v č. 6. Fáza +C je o 120° posunutá od fázy +B, takže +C je v č.5 a -C v č.2. Všimnime si, že ak je $q = 1$, sú drážky po obvode (360°) obsadené fázami takto: +A, -C, +B, -A, +C, -B. Na pólom rozstupe 180° zaberá jedna fáza 60° .

V okamihu t_2 nadobúda fáza B kladné maximum, čiže prúd v drážke č. 3 označíme krížikom a v drážke č. 6 bodkou. Postupom podobným ako v okamihu t_1 označíme polaritu prúdov ďalších dvoch fáz a určíme smer magnetického poľa (obr. 3.2.3c). V okamihu t_3 nadobúda kladné maximum fáza C, označíme smery prúdov a určíme smer magnetického poľa (obr. 3.2.3 d). O ďalších 120° opäť nadobúda kladné maximum fáza A, čiže sme uzavreli jednu periódu, a platí obr.3.2.3b). Vidíme, že počas tejto periódy sa smer magnetického poľa v dvojpólovom stroji posunul o jednu otáčku. Tým sme jednak splnili úlohu a určili v každom okamihu smer magnetického poľa a jednak sme graficky interpretovali vznik točivého magnetického poľa. Ďalšia úloha je nakresliť fázorový diagram. Najmenší spoločný deliteľ Q a p , t. j. 6 a 1 je číslo 1, čiže $t = 1$.

Počet fázorov je

$$F = \frac{Q}{t} = \frac{6}{1} = 6$$

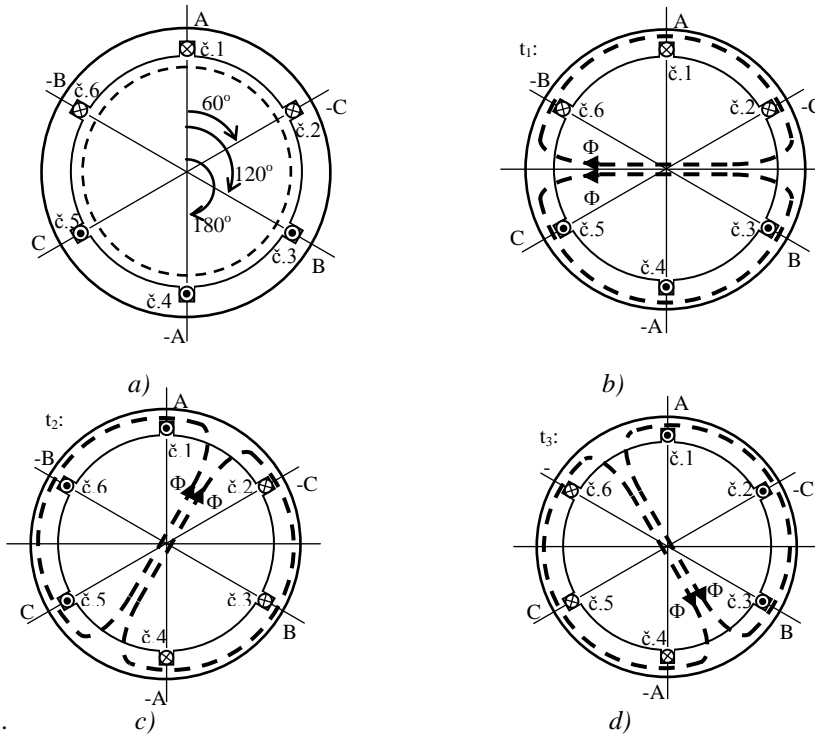
ktoré sú posunuté o uhol

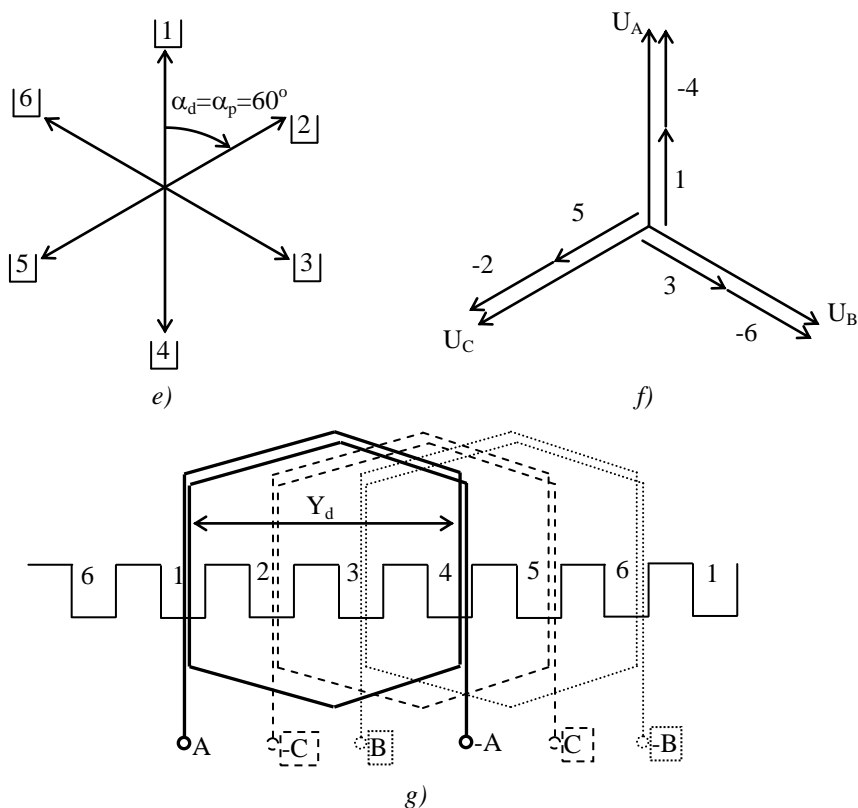
$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{F} = \frac{360^\circ}{Q} t = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

Tento uhol je v tomto prípade totožný s uhlom, o ktorý sú posunuté fázory napätia dvoch susedných drážok:

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q} = \frac{360^\circ \cdot 1}{6} = 60^\circ$$

Fázorový diagram je na obr. 3.2.3 e), kde vidno aj rozmiestnenie drážok. Z fázorov tohto diagramu určíme fázové napätia jednotlivých fáz. Napätie fázy A nakreslíme tak, že z fázorového diagramu vyberieme len fázory tých drážok, v ktorých je cievka fázy A, čiže fázor drážky č. 1 a na neho napojený fázor drážky č. 4 so zápornou polaritou (pozri obr. 3.2.3 f). Podobne postupujeme s fázou B a fázou C. Vidíme, že napätia jednotlivých fáz sú tvorené algebraickým súčtom napätí v dvoch drážkach, a že fázové napätia sú posunuté o 120° a tvoria súmernú hviezdu. Ilustračný obrázok uloženia cievok fáz A, B, C s jedným závitom je na obr. 3.2.3 g).





Obr. 3.2.3 a),b),c),d) Grafická interpretácia točivého magnetického poľa v dvojpólovom stroji, e) fázorový diagram, f) fázové napätia, g) uloženie cievok s počtom závitov $N = 2$ jednotlivých fáz v drážkach

Príklad 2

Navrhňte trojfázové vinutie pre dvojpólový stroj, ak počet drážok na pól a fázu je 2. Nakreslite fázorový diagram a nakreslite fázové napätia jednotlivých fáz. Nakreslite ilustračný obrázok uloženia fáz v drážkach.

Riešenie:

Ak $m = 3, 2p = 2, q = 2 \Rightarrow Q = 2pmq = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$. Teda po obvode rozmiestnime 12 drážok, ktoré rezervujeme pre jednotlivé fázy v takomto poradí: +A, +A, -C, -C, +B, +B, -A, -A, +C, +C, -B, -B (obr. 3.2.4 a).

V porovnaní s príkladom 1 môžeme konštatovať, že poradie fáz je rovnaké, avšak pre jednotlivé fázy rezervujeme q drážok, t. j. po obvode umiestňujeme fázy takto:

$q(+A)$, $q(-C)$, $q(+B)$, $q(-A)$, $q(+C)$, $q(-B)$. Toto poradie si treba zapamätať, takto sa tvoria aj zložitejšie vinutia. Podobným spôsobom ako v príklade 1 určíme smer prúdov v jednotlivých drážkach (obr.3.2.4a) a následne smer magnetického poľa a jeho pohyb po obvode vrtania. Ďalší výpočet urobíme s rovnakým postupom ako v príklade 1: Najmenší spoločný deliteľ čísel 12 a 1 je $t = 1$. Počet fázorov fázorového diagramu je

$$F = \frac{Q}{t} = \frac{12}{1} = 12$$

ktoré sú posunuté o uhol

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{F} = \frac{360^\circ}{Q} t = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$$

Fázory napätia dvoch susedných drážok sú posunuté o uhol:

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q} = \frac{360^\circ \cdot 1}{12} = 30^\circ$$

Fázorový diagram je na obr. 3.2.4 b). Z fázorov tohto diagramu určíme fázové napätia jednotlivých fáz, ktoré vidíme na obr. 3.2.4c. Oproti príkladu 1 má tento diagram fázových napätí jeden podstatný rozdiel, a síce ten, že fázory, z ktorých sa skladá napätie jednej fázy sú fázovo posunuté. Preto geometrický súčet napätí je menší ako algebraický súčet napätí jednotlivých drážok patriacich danej fáze. Táto skutočnosť sa vyjadruje koeficientom rozloženia vinutia, ktorý vyjadruje, v akom pomere je geometrický a algebraický súčet napätí:

$$k_d = \frac{\text{geometrický } \sum \text{ napätí}}{\text{algebraický } \sum \text{ napätí}} \leq 1$$

Inými slovami, celkové napätie je redukované koeficientom rozloženia vinutia, ak napätia v drážkach, ktoré patria jednej fáze, sú fázovo posunuté. Pritom tieto napätia sú fázovo posunuté vtedy, ak je počet drážok na pól a fázu vyšší ako jedna. Preto môžeme konštatovať, že:

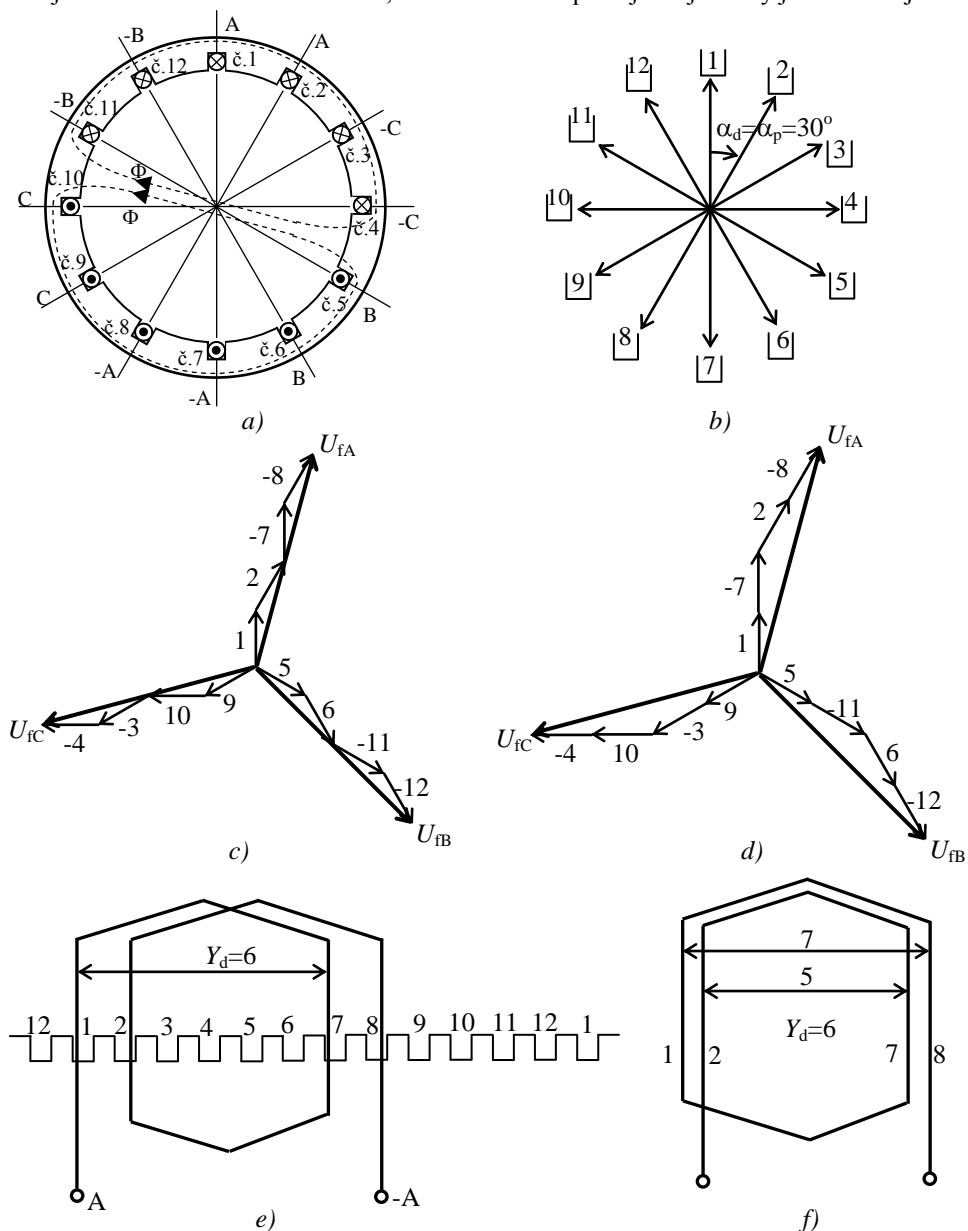
$$k_d = 1, \text{ ak } q = 1, \text{ pozri obr.3.2.3}$$

$$k_d < 1, \text{ ak } q > 1, \text{ pozri obr.3.2.4.}$$

Všimnime si teraz podrobnejšie, ako vzniklo napätie fázy na obr. 3.2.4 c). Napätia sú sčítané v poradí, v akom idú drážky fázy A po obvode. Treba však poznamenať, že to isté napätie by sme dostali aj akýmkoľvek iným poradím. Napr. na obr. 3.2.4 d) je iné poradie, ktoré zodpovedá navíjaniu fázy A podľa obr. 3.2.4e). Vidíme, že rozpätie cievok je rovnaké, dané počtom drážok na pól, čiže plnému kroku:

$$Y = Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{12}{2} = 6.$$

Ale rovnaké fázové napätie dosiahneme aj keď budú cievky navinuté podľa obr. 3.2.4f), kde je stredná hodnota kroku síce 6, ale skutočné rozpätie jednej cievky je 5 a druhej 7.



Obr. 3.2.4 a) Pričný rez trojfázového dvojpólového stroja s $q = 2$, b) fázorový diagram, c) a d) diagram fázových napätí, e) a f) možné spôsoby navíjania fázy A.

Príklad 3

Navrhnete trojfázové vinutie pre štvorpólový stroj, ak počet drážok na pól a fázu je 1. Nakreslite fázorový diagram a nakreslite fázové napätia jednotlivých fáz. Nakreslite ilustračný obrázok uloženia fáz v drážkach.

Riešenie:

Ak $m = 3, 2p = 4, q = 1 \Rightarrow Q = 2pmq = 4 \cdot 3 \cdot 1 = 12$. Čiže najmenší počet drážok trojfázového stroja, s ktorým možno vytvoriť štvorpólové pole, je 12. Okrem toho je to ten istý počet drážok, s ktorými sme v predchádzajúcom príklade vytvorili dvojpólové pole. Takže tento jednoduchý príklad môže poslúžiť na pochopenie zmeny počtu pólov prepínaním vodičov v jednotlivých drážkach do cievok tvoriacich fázy. Vinutie musí mať dostatočný počet vývodov, aby prepínanie bolo možné.

Teraz vytvárame štvorpólové pole s $q = 1$, takže drážky obsadzujeme fázami nasledujúco:

+A, -C, +B, -A, +C, -B, +A, -C, +B, -A, +C, -B, ako to vidíme na obr. 3.2.5a), kde sú označené aj polarita prúdov v drážkach a následne je určený smer magnetického poľa. Tu názorne vidíme, že v 12 drážkach sme teraz vytvorili štvorpólové pole.

Počet fázorov fázorového diagramu je

$$F = \frac{Q}{t} = \frac{12}{2} = 6$$

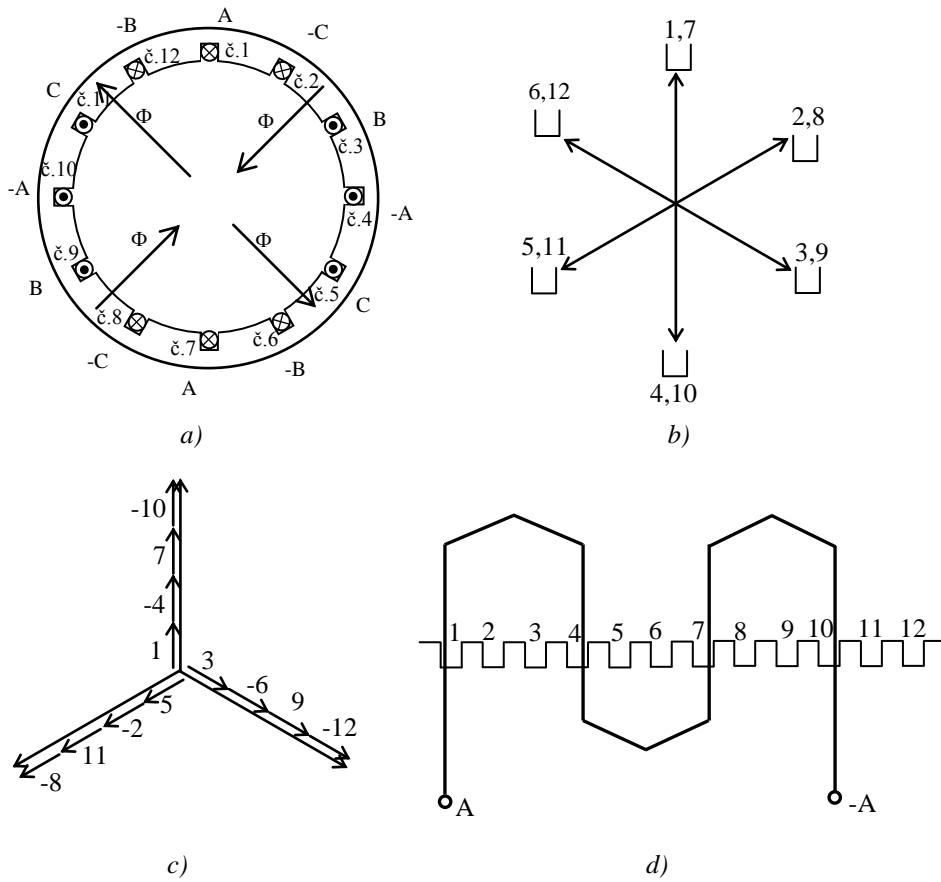
lebo najvyšším spoločným deliteľom čísel 12 a 2 je $t = 2$. Fázory sú posunuté o uhol

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{F} = \frac{360^\circ}{Q} t = \frac{360^\circ}{12} \cdot 2 = 60^\circ$$

a fázory napätia dvoch susedných drážok sú posunuté o uhol:

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q} = \frac{360^\circ \cdot 2}{12} = 60^\circ$$

Fázorový diagram je na obr. 3.2.5 b). Vidíme, že na vyjadrenie napätia vždy v dvoch a dvoch drážkach stačí jeden fázor, pretože predstavujú rovnakú pozíciu v magnetickom poli. Z fázorov tohto diagramu vytvoríme diagram fázových napätí jednotlivých fáz, ktoré vidíme na obr. 3.2.5c). Vzhľadom na to, že $q = 1$, nenastáva žiadny fázový posun napätí a napätia sa sčítavajú algebraicky. Výsledné fázové napätie nie je redukované fázovým posunom a koeficient rozloženia vinutia $k_d = 1$. Spôsob navíjania fázy A, ak má cievka len jeden závit, je na obr.3.2.5d).



Obr. 3.2.5 a) Priečný rez trojfázového štvorpólového stroja s $q = 1$, b) fázorový diagram, c) diagram fázových napätí, e) spôsob navijania fázy A.

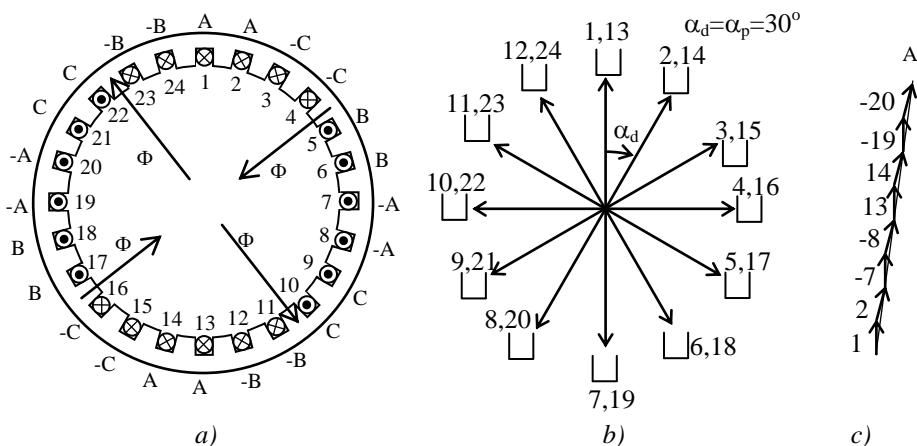
Príklad 4

Navrhните trojfázové vinutie pre štvorpólový stroj, ak počet drážok na pól a fázu je 2. Nakreslite fázorový diagram a nakreslite fázové napätia jednotlivých fáz. Nakreslite ilustračný obrázok uloženia fáz v drážkach.

Riešenie:

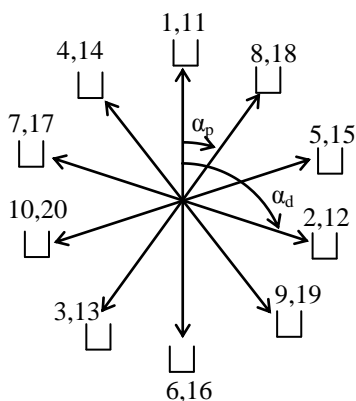
Ak $m = 3, 2p = 4, q = 2 \Rightarrow Q = 2pmq = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24$. Teda po obvode rozmiestnime 24 drážok, ktoré rezervujeme pre jednotlivé fázy v takomto poradí: +A, +A, -C, -C, +B, +B, -A, -A, +C, +C, -B, -B, +A, +A, -C, -C, +B, +B, -A, -A, +C, +C, -B, -B

(obr. 3.2.6a). Postupom uplatneným v predchádzajúcich príkladoch dostaneme, že $t = 2$, teda fázorový diagram bude mať 12 lúčov, posunutých od seba o 30° , o ten istý uhol sú posunuté fázory napätí v susedných drážkach (obr. 3.2.6b). Z týchto lúčov fázorového diagramu zostrojíme diagram fázových napätí, napätie fázy A je na obr. 3.2.6 c). Tu vidíme, že výsledné fázové napätie je menšie ako algebraický súčet napätí jednotlivých drážok, pretože napätia v drážkach sú fázovo posunuté. Teda opäť sa uplatní koeficient rozloženia vinutia, ktorým sa algebraický súčet napätí redukuje na výsledné napätie vždy, keď počet drážok na pól a fázu je väčší ako 1. V ďalšom odvodíme vzťah pre tento koeficient.

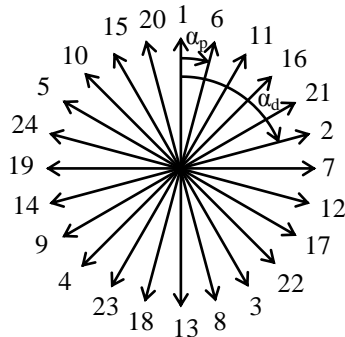


Obr. 3.2.6 a) Priečný rez trojfázového štvorpólového stroja s $q = 2$, b) fázorový diagram, c) diagram fázového napätia fázy A.

Na ukážku na obr. 3.2.7 a 3.2.8 sú fázorové diagramy zlomkových vinutí.



Obr. 3.2.7 Fázorový diagram zlomkového vinutia $m = 3$, $2p = 12$, $Q = 20$, $q = 20/(12 \cdot 3) = 5/9$, $t = 2$, $F = 10$, $\alpha_p = 36^\circ$, $\alpha_d = 108^\circ = 3\alpha_p$



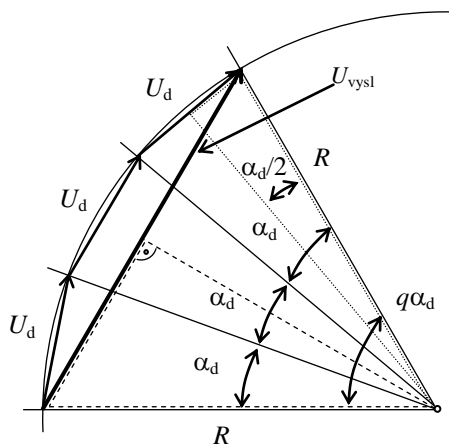
Obr. 3.2.8 Fázorový diagram zlomkového vinutia $m = 3$, $2p = 10$, $Q = 24$, $q = 24/(10.3) = 4/5$, $t = 1$, $F = 24$, $\alpha_p = 15^\circ$, $\alpha_d = 75^\circ = 5\alpha_p$

3.2.3 Koefficient rozloženia vinutia

Ako sme videli v predchádzajúcich príkladoch, ak je $q > 1$, drážkové napätia jednej fázy sa sčítavajú s fázovým posunom, takže výsledné fázové napätie je menšie ako by dal ich algebraický súčet. Teraz odvodíme vzťah pre koeficient, ktorým danú redukciu napätia vypočítame:

Podľa obr. 3.2.9 je pomer geometrického a algebraického súčtu q -drážkových napätí U_d daný pomerom:

$$k_d = \frac{\text{geometrický } \sum}{\text{algebraický } \sum} = \frac{U_{\text{vysl}}}{qU_d}$$



Obr. 3.2.9 Ilustračný obrázok k odvodeniu koeficienta rozloženia vinutia s $q = 3$

Pre pravouhlé trojuholníky naznačené na obrázku platí:

$$\sin \frac{q\alpha_d}{2} = \frac{\frac{U_{\text{vysl}}}{2}}{R} \Rightarrow U_{\text{vysl}} = 2R \sin \frac{q\alpha_d}{2}$$

$$\sin \frac{\alpha_d}{2} = \frac{\frac{U_d}{2}}{R} \Rightarrow U_d = 2R \sin \frac{\alpha_d}{2}$$

$$k_d = \frac{U_{\text{vysl}}}{qU_d} = \frac{2R \sin \frac{q\alpha_d}{2}}{q \cdot 2R \sin \frac{\alpha_d}{2}}$$

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha_d}{2}}{q \sin \frac{\alpha_d}{2}}$$

Toto je základný vzťah pre výpočet koeficienta rozloženia vinutia, vrátime sa k nemu pri uvažovaní harmonických zložiek neharmonických napätí. Teraz tento vzťah upravíme:

$$k_d = \frac{\sin \frac{Q}{2pm} \frac{360^\circ p}{2Q}}{q \sin \frac{360^\circ p}{2 \cdot 2pmq}} = \frac{\sin \frac{90^\circ}{m}}{q \sin \frac{90^\circ}{mq}}$$

Pre trojfázové stroje dosadíme $m = 3$:

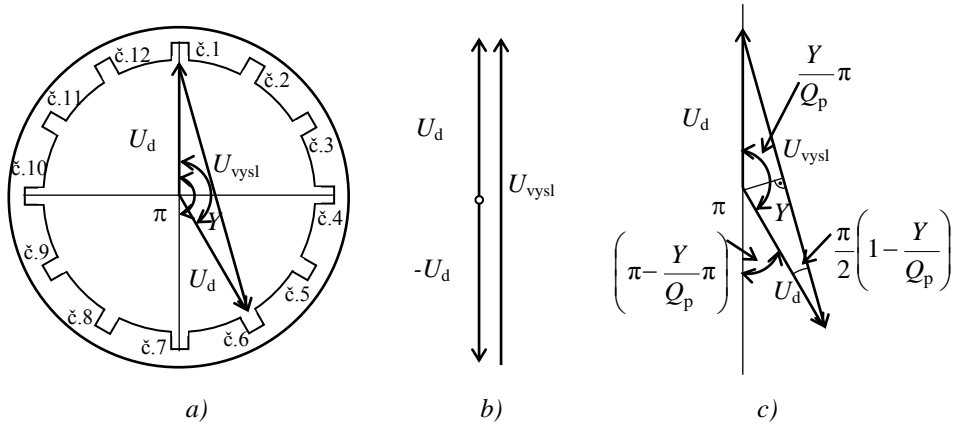
$$k_d = \frac{\sin 30^\circ}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{1}{2q \sin \frac{30^\circ}{q}}$$

Tento vzťah sa používa najčastejšie, pretože obvykle sa počíta napätie pre základnú harmonickú v trojfázových strojoch.

3.2.4 Koeficient kroku

Druhý dôvod, prečo sa redukuje súčet drážkových napätí jednej fázy vinutia je skrátенý krok. Ako uvidíme v kapitole o neharmonickom napätí, na vylúčenie harmonických zložiek napätia sa používa skrátенý krok, t. j. krok, čiže rozpätie cievky, je menší ako pólový rozstup, teda plný krok. Na obr. 3.2.10a) vidno aké je rozpätie cievky so skrátенým krokom, na obr. 3.2.10b) je súčet drážkových napätí pri plnom kroku, čiže

algebraický súčet obidvoch drážkových napätí, keby cievkové strany boli v drážkach 1 a 7. Na obr. 3.2.10c), je ukázaný súčet drážkových napätí a geometrické pomery pri skrátrenom kroku, čiže aký je ich geometrický súčet. Na základe tohto obrázku odvodíme vzťah pre koeficient skrátrenia kroku.



Obr. 3.2.10 K odvodu koeficienta kroku a) rozpätie cievky so skrátreným krokom, b) súčet drážkových napätí pri plnom kroku, c) súčet drážkových napätí pri skrátrenom kroku

Ako je známe, plný krok vyjadrený v radiánoch je π , a v počte drážok Q_p . Krok v počte drážok je Y , skrátrenie kroku je teda Y / Q_p , preto uhol skrátreného kroku je $(Y / Q_p)\pi$.

Doplnok do π , čo je súčet radiánov v trojuholníku, je $(\pi - \frac{Y}{Q_p}\pi) = \pi(1 - \frac{Y}{Q_p})$.

Pretože ide o rovnostranný trojuholník so stranami U_d , rozdelí sa táto hodnota na polovicu medzi zvyšné dva uhly, ako je to na obrázku: $\frac{\pi}{2}(1 - \frac{Y}{Q_p})$.

Koeficient skrátrenia kroku definujeme ako pomer geometrického a algebraického súčtu drážkových napätí:

$$k_p = \frac{U_{vysl}}{2U_d}$$

Ak vyjadríme kosínus uhla $\frac{\pi}{2}(1 - \frac{Y}{Q_p})$ v naznačenom pravouhlom trojuholníku, zistíme,

že je to práve definovaný koeficient kroku:

$$\cos \frac{\pi}{2}(1 - \frac{Y}{Q_p}) = \frac{U_{vysl}/2}{U_d} = \frac{U_{vysl}}{2U_d} = k_p$$

Po úprave tejto goniometrickej funkcie dostaneme výsledný vzťah:

$$k_p = \sin\left(\frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2}\right)$$

alebo ak chceme vyjadriť uhol v stupňoch:

$$k_p = \sin\left(\frac{Y}{Q_p} 90^\circ\right)$$

Z tohto vzťahu vidno, že ak je krok plný, t. j. $Y = Q_p$, koeficient kroku je rovný 1, k redukcii napätia nedochádza, ako to vidno aj na obr. 3.2.10b). Ak je krok skráteneý, koeficient skráteneý kroku je menší ako jedna, dochádza k redukcii napätia (obr. 3.2.10c), a to o to viac, o koľko je Y menší ako Q_p . Odporúčanie, ako treba krok skracovať uvedieme v kapitole o vylúčení harmonických zložiek z indukovaného napätia.

3.2.5 Koeficient vinutia

Z toho, čo sme uviedli v predchádzajúcich dvoch kapitolách, vyplýva, že existujú dva dôvody, kvôli ktorým sa indukované napätie môže redukovať. Ak nastanú obidva dôvody naraz, zavádzame koeficient vinutia, ktorý je súčinom obidvoch doteraz zavedených koeficientov:

$$k_v = k_d k_p \leq 1$$

3.2.6 Indukované napätie vo vinutí striedavých točivých strojov

Okamžitá hodnota indukovaného napätia v jednom vodiči v drážke striedavého elektrického stroja:

$$u_i = B_\delta l_{Fe} v$$

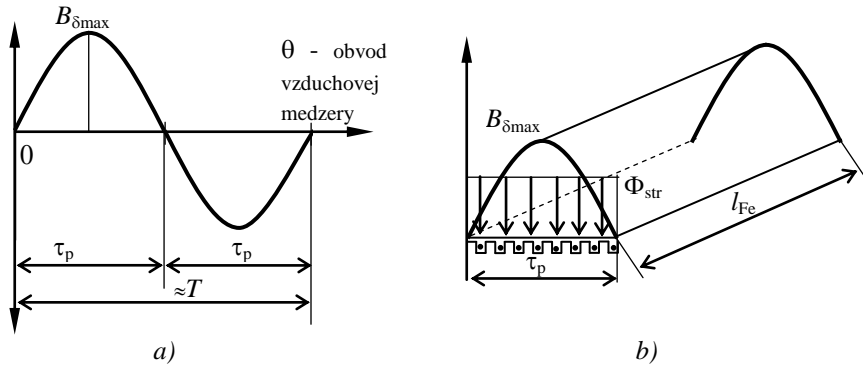
kde B_δ je magnetická indukcia vo vzduchovej medzere, l_{Fe} je dĺžka vodiča daná dĺžkou stroja, a v je rýchlosť, ktorou je vodič pretínaný magnetickým poľom.

Za dobu jednej periódy T sa vlna točivého magnetického poľa ideálneho sínusového tvaru posunie o dva pólové rozstupy, ako to vidno na obr. 3.2.11 a pretína skúmaný vodič, aby sa v ňom indukovalo napätie. Teda rýchlosť pohybu magnetického poľa je:

$$v = \frac{2\tau_p}{T} = 2\tau_p f$$

Efektívna hodnota indukovaného napätia vo vodiči je:

$$U_{iv} = \frac{B_{\delta\max}}{\sqrt{2}} l_{Fe} 2\tau_p f$$



Obr. 3.2.11 a) Vlna točivého magnetického poľa, b) stredná hodnota magnetického poľa

Na rozdiel od jadra transformátora, kde všetky závitky sú pretínané rovnakým poľom, na obr. 3.2.11b) vidno, že vodiče po obvode vzduchovej medzery sú vystavené sínusovej vlně magnetického poľa, a preto každý vodič je v inej magnetickej indukčii (napr. niektoré v nulovom poli, iné v maximálnej hodnote poľa). Aby sme toto pôsobenie rovnomerne rozdelili na všetky vodiče, určíme strednú hodnotu magnetického poľa a budeme predpokladať, že všetky vodiče sú vystavené tomuto poľu, takže môžeme určiť efektívnu hodnotu indukovaného napätia jedného vodiča a tieto napätia potom v rámci jednej fázy sčítavať.

$$\Phi_{\text{str}} = B_{\delta\text{str}} l_{\text{Fe}} \tau_p \cdot$$

$$B_{\delta} \text{ rozložená na } \tau_p \text{ je } B_{\delta\text{str}} = \frac{2}{\pi} B_{\delta\text{max}} \Rightarrow B_{\delta\text{max}} = \frac{\pi}{2} B_{\delta\text{str}} \cdot$$

Tieto vzťahy dosadíme do vzťahu pre U_{iv} a dostaneme vzťah pre efektívnu hodnotu indukovaného napätia jedného vodiča:

$$U_{\text{iv}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} B_{\text{str}} l_{\text{Fe}} 2\tau_p f = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi_{\text{str}} f$$

Teraz určíme efektívnu hodnotu indukovaného napätia jednej fázy: Najprv sčítame napätia vo vodičoch jednej drážky $\frac{N}{pq} U_{\text{iv}}$, potom v toľkých drážkach, ktoré patria jednej fáze a pólu, krát počet pólov $\frac{N}{pq} U_{\text{iv}} q 2p$ a nakoniec tento lineárny súčet napätí redukuje koeficientom vinutia $\frac{N}{pq} U_{\text{iv}} q 2pk_v$. Takže efektívna hodnota indukovaného napätia jednej fázy striedavého elektrického stroja je:

$$U_{\text{if}} = U_{\text{iv}} \frac{N}{pq} q 2pk_v = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi_{\text{str}} f \frac{N}{pq} q 2pk_v = \sqrt{2} \pi f \Phi_{\text{str}} N k_v \cdot$$

Vidíme, že v porovnaní so vzťahom pre indukované napätie jednej fázy transformátora je jeden rozdiel v tom, že vo vzťahu vystupuje stredná hodnota magnetického poľa, nie maximálna ako v transformátore a druhý rozdiel je v tom, že sa napätie sčítava na redukovanom počte závitov Nk_v .

Pripomeňme, že tento vzťah platí pre sínusový priebeh magnetického poľa (magnetickej indukcie) vo vzduchovej medzere.

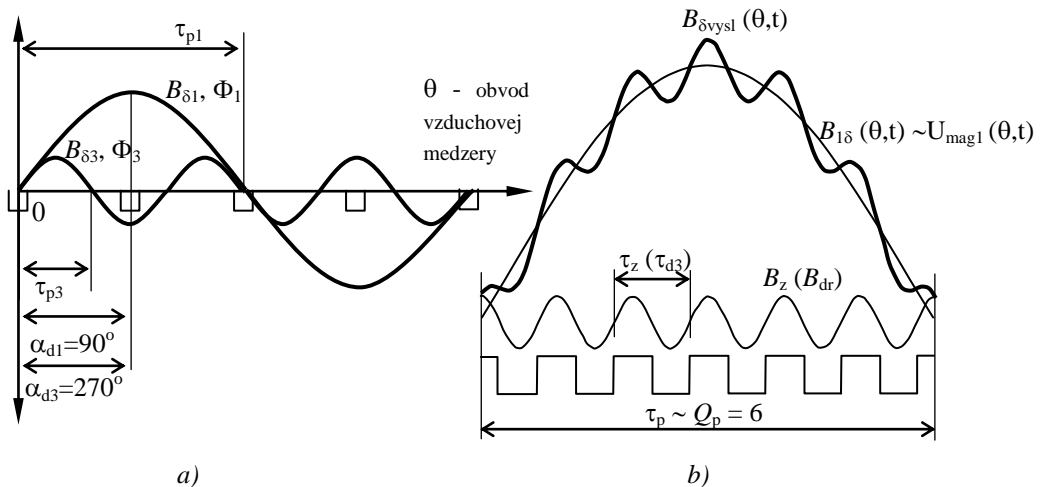
3.2.7 Indukované napätie pri neharmonickom magnetickom poli

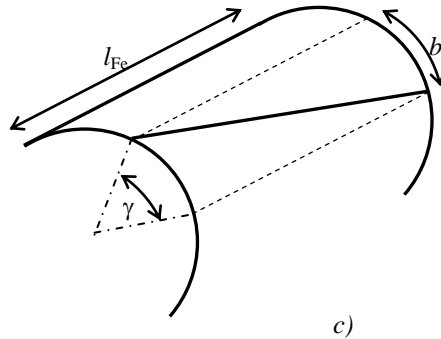
Magnetické pole, ktoré vo vinutí indukuje napätie, nie je harmonické, ako sme predpokladali v predchádzajúcej kapitole, ale neharmonické, napr. kvôli tomu, že vinutie je uložené v drážkach s konštantným počtom vodičov v drážkach. Tým je priebeh magnetického napätia vo vzduchovej medzere stupňovitý, (pozri obr. 3.2.21, a 22), a teda neharmonický, čo spôsobuje aj neharmonický priebeh magnetického poľa. V skutočnosti teda magnetické pole obsahuje priestorové harmonické zložky, ktoré sú obvykle nepárneho rádu. Ak je magnetické pole neharmonické, má neharmonický tvar aj magnetická indukcia vo vzduchovej medzere. Preto treba urobiť rozklad do Fourierovho radu na základnú (prvú) a harmonické zložky magnetického poľa.

Pre ν -tú priestorovú harmonickú má príslušná vlna magnetickej indukcie namiesto $2p$ pólov až $2\nu p$ -pólov a pólový rozstup ν -tej harmonickej je:

$$\tau_{p\nu} = \frac{\tau_{p1}}{\nu}$$

Na obr. 3.2.12 je ilustračný obrázok pre prvú a tretiu harmonickú, kde vidno, že tretia harmonická má $2 \times 3 = 6$ pólov, a že ak je vzdialenosť dvoch drážok pre základnú harmonickú 90° , pre tretiu harmonickú je to 270° , t. j. 3-krát viac, čiže ν -krát viac. Inak povedané, uhol dvoch susedných drážok pre ν -tú harmonickú je $\alpha_{d\nu} = \nu\alpha_d$.





Obr. 3.2.12 Ilustračný obrázok pre a) základnú (prvú) a tretiu harmonickú zložku magnetickej indukcie a magnetického toku, b) vzťah základnej harmonickej a drážkových harmonických pre $Q = 24$, $2p = 4$, $Q_p = Q/2p = 24 / 4 = 6$, c) zošíkmenie drážky o jeden drážkový rozstup

Tým sa mení činiteľ rozloženia vinutia pre ν -tú harmonickú:

$$k_{d\nu} = \frac{\sin \nu \frac{q\alpha_d}{2}}{q \sin \nu \frac{\alpha_d}{2}}$$

aj činiteľ skrátenia kroku:

$$k_{p\nu} = \sin \nu \frac{Y}{Q_p} 90^\circ$$

a tým aj činiteľ vinutia:

$$k_{\nu\nu} = k_{d\nu} k_{p\nu} = \frac{\sin \nu \frac{q\alpha_d}{2}}{q \sin \nu \frac{\alpha_d}{2}} \sin \nu \frac{Y}{Q_p} 90^\circ$$

Indukované napätie ν -tej harmonickej zložky zdroja, napr. synchronného generátora:

$$U_{i\nu} = \sqrt{2} \pi f_\nu \Phi_{str\nu} N k_{\nu\nu}$$

kde

$$f_\nu = \nu f_1$$

$$\Phi_{str\nu} = \frac{2}{\pi} B_{\delta \max \nu} \tau_{p\nu} I_{Fe} = \frac{2}{\pi} B_{\delta \max \nu} \frac{\tau_{p1}}{\nu} I_{Fe}$$

Ak urobíme pomer harmonickej a základnej zložky:

$$\frac{U_{i\nu}}{U_{i1}} = \frac{\sqrt{2} \pi f_{\nu} \Phi_{\text{str}\nu} N k_{\nu\nu}}{\sqrt{2} \pi f_1 \Phi_{\text{str}1} N k_{\nu1}} = \frac{\sqrt{2} \pi \nu f_1 \frac{2}{\pi} B_{\delta \text{max}\nu} \frac{\tau_{p1}}{\nu} l_{\text{Fe}} N k_{\nu\nu}}{\sqrt{2} \pi f_1 \frac{2}{\pi} B_{\delta \text{max}1} \tau_{p1} l_{\text{Fe}} N k_{\nu1}} = \frac{B_{\delta \text{max}\nu} k_{\nu\nu}}{B_{\delta \text{max}1} k_{\nu1}}$$

dostaneme vzťah pre indukované napätie harmonickej zložky:

$$U_{i\nu} = U_{i1} \frac{B_{\delta \text{max}\nu} k_{\nu\nu}}{B_{\delta \text{max}1} k_{\nu1}}$$

Tento vzťah je dôležitý preto, že tu vidno, aký význam má skrátenie kroku.

Skrátenie kroku

Na predchádzajúcom vzťahu možno ukázať, ako sa dá redukovať napätie harmonickej zložky napätia, aj keď magnetické pole ich obsahuje. Ukazuje sa, že napätie v ν -tej harmonickej bude nulové, ak bude nulový koeficient vinutia v ν -tej harmonickej ($k_{\nu\nu} = 0$). Ten bude nulový vtedy, ak bude nulová aspoň jedna z jeho zložiek, napr. koeficient kroku:

$$k_{p\nu} = \sin \nu \frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2} = 0$$

Toto platí vtedy, keď je argument funkcie rovný 0, π , alebo násobok π :

$$\nu \frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2} = k \pi$$

$$\frac{Y}{Q_p} = \frac{2k}{\nu}$$

Ako sme spomenuli, ν je nepárne číslo a čitateľ je párne číslo $2k$. K nepárnemu číslu ν dostaneme párne číslo pričítaním, alebo odčítaním 1:

$$\frac{Y}{Q_p} = \frac{\nu \pm 1}{\nu}$$

Čiže túto rovnosť dostaneme tak, že krok Y sa má len málo líšiť od plného kroku Q_p , napr. 5/6, 8/9 atď. Napr. skrátením kroku na 5/6 dostaneme nasledujúce hodnoty koeficientov skrátenia kroku pre jednotlivé harmonické zložky:

ν	1	3	5	7	9	11
$k_{p\nu}$	0,966	-0,707	0,259	0,259	-0,707	0,965

Ako vidíme, skrátením kroku na 5/6 sa najvýraznejšie redukujú piata a siedma harmonická zložka. Tretia a jej násobky sú značné, ale sa v trojfázových vinutiach zrušia v združenom napätí pri zapojení do hviezdy, alebo sa uzavrú kolobehom v trojuholníku. Jedenásta sa redukuje málo, ale jej amplitúda je obvykle nízka. Základná harmonická sa redukuje tiež, ale nepodstatne.

Z uvedeného vyplýva, že skrátením kroku sa napätia harmonických zložiek redukujú, aj keď sa úplne nezrušia. Ďalší spôsob ako redukovať vplyv harmonických zložiek poľa je urobiť zošíkmenie drážok.

Zošikmenie drážok

Ak stupňovitý priebeh magnetického napätia vo vzduchovej medzere nahradíme základnou harmonickou a harmonickými zložkami, pri ďalšej analýze môžeme pracovať so základnou harmonickou magnetického napätia. Ak zanedbáme drážkovanie a považujeme vzduchovú medzeru za konštantnú, magnetická indukcia vo vzduchovej medzere bude úmerná magnetickému napätiu:

$$B_{\delta}(\theta, t) = \frac{\mu_0 U_{\text{mag}}(\theta, t)}{\delta}$$

V skutočnosti sa vzduchová medzera po obvodu mení s otvorením drážok (pozri obr. 3.2.12b), a preto sa na priebeh základnej harmonickej superponuje periodická funkcia, ktorej základná vlna má pólový rozstup rovný drážkovému (zubovému) rozstupu τ_z , a teda na jeden pólový rozstup základnej harmonickej pripadá $Q_p = Q/2p$ vln drážkovania, čiže na celú vlnu Q/p vln drážkovania. Napr. na obr. 3.2.12b) je na jednom pólovom rozstupe základnej harmonickej 6 vln drážkovania. Preto výsledný priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere a magnetického poľa je neharmonický. Interferenciou medzi základnou harmonickou poľa a periodickou zmenou vzduchovej medzery vznikajú vlny rádu

$$\nu_z = c \frac{Q}{p} \pm 1 = 2mqc \pm 1 = 6qc \pm 1, \text{ kde } c \text{ je celé číslo } c = 1, 2, 3, \dots$$

a tieto harmonické menujeme drážkové, alebo zubové harmonické. Najväčší vplyv majú harmonické pre $c = 1$. Tieto harmonické sa vyznačujú tým, že ich činiteľ vinutia je rovnako veľký ako pre základnú harmonickú, preto sa z priebehu poľa nedajú eliminovať skrátením kroku bez toho, aby tým neutrpla základná vlna napätia.

Vplyv drážkových harmonických na klieťku asynchronných motorov sa dá zmierniť natočením drážok o jeden rozstup statorových drážok, pretože činiteľ zošíkmenia pre ν -tú harmonickú je

$$k_{s\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\gamma}{2}}{\nu \frac{\gamma}{2}} = \frac{\sin \frac{\nu b \pi}{2 \tau_p}}{\frac{\nu b \pi}{2 \tau_p}} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}}{\nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}}$$

kde b je zošíkmenie merané na obvoде vrtania a $\gamma = b \frac{\pi}{\tau_p}$ je príslušný uhol, o ktorý je drážka natočená. Zošíkmením by sa mali eliminovať drážkové harmonické rádu $\nu = (2mqc \pm 1)$, kde c je celé číslo 1,2,3,..., čiže pre trojfázové obvody $m = 3$, ide o harmonické rádu $\nu = (6qc \pm 1)$ a pre $q = 1$ by išlo o harmonické 5, 7, 11, 13, 17, 19, atď., t. j. nepárne, nie násobky troch.

Aby sa tieto harmonické eliminovali (vylúčili), koeficient zošíkmenia by mal byť rovný nule, t. j. jeho čitateľ by mal byť rovný nule:

$$\sin \frac{(2mcq \pm 1)b\pi}{2\tau_p} = 0$$

Aby platila táto rovnosť, potom argument funkcie sínus musí byť rovný nule, alebo celočíselnému násobku π :

$$\frac{(2mcq \pm 1)b\pi}{2\tau_p} = k\pi \Rightarrow k = \frac{(2mcq \pm 1)b}{2\tau_p}$$

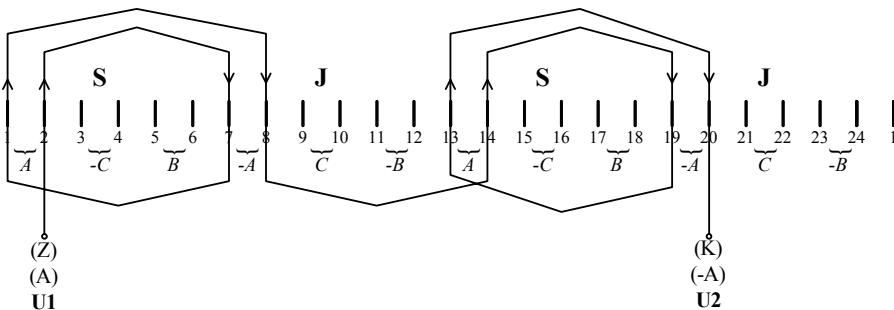
Potom

$$\frac{b}{\tau_p} = k \frac{2}{2mqc \pm 1} \approx \frac{1}{mqc} \quad \text{a pre } k = c = 1 \text{ je } \frac{b}{\tau_p} = \frac{1}{mq} = \frac{1}{Q/2p} = \frac{1}{Q_p}$$

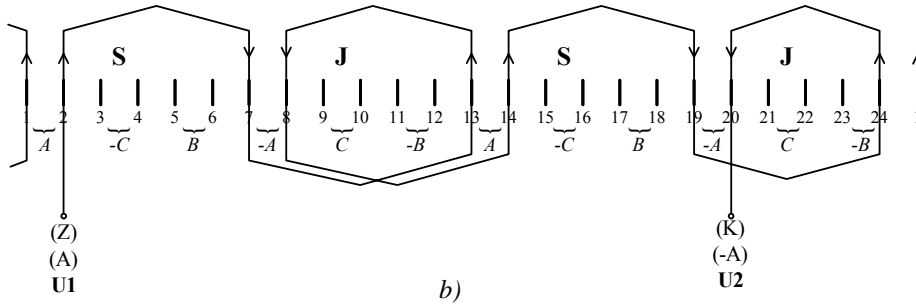
čo znamená, že zošíkmenie merané na obvoде vrtania b sa má k pólovému rozstupu τ_p tak, ako sa má 1 drážka k počtu drážok na pól. Čiže ide o zošíkmenie drážok o jeden drážkový rozstup (pozri obr. 3.2.12c).

3.2.8 Základné druhy vinutia

Jednovrstvové vinutie s plným krokom možno navinúť buď ako pól párové cievky, kde sa počet cievok rovná počtu pólových dvojíc (obr. 3.2.13a), alebo ako pólové cievky, kde sa počet cievok sa rovná počtu pólov (obr. 3.2.13b).

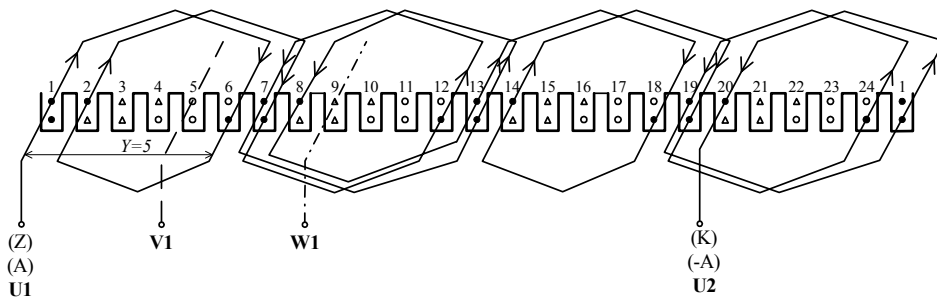


a)



Obr. 3.2.13 Jednovrstvové vinutie $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $Q = 24$, plný krok, a) pólparové cievky, b) pólové cievky

Dvojvrstvové vinutie so skráteným krokom $Y = 5/6Q_p$ je na obr. 3.2.14. Všimnime si, že skrátením kroku sa v niektorých drážkach vyskytujú dve rôzne fázy. Tým dochádza k posunu fázy medzi hornou a dolnou vrstvou dvojvrstvého vinutia.



Obr. 3.2.14 Dvojvrstvové vinutie so skráteným krokom $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $Q = 24$, $Y = 5/6Q_p$

3.2.9 Grafická analýza zmeny smeru točivého magnetického poľa

Ako sme už vysvetlili, točivé magnetické pole, ktoré je princípom činnosti striedavých strojov točivých sa vytvára tak, že 3-fázová sústava prúdov s rovnakou amplitúdou, ale navzájom posunutých o 120° časovo, napája 3 fázové rozložené vinutie, ktoré pozostáva z troch samostatných vinutí, posunutých priestorovo o 120° elektrických.

Táto sústava potom vytvára točivé magnetické pole s konštantnou amplitúdou a rýchlosťou závislou od amplitúdy a frekvencie prúdov. Tento spôsob vzniku točivého poľa budeme analyzovať graficky aj analyticky. Vyskytuje sa buď v indukčných strojoch, alebo v synchronných strojoch so zaťažou kotvou t. j., keď statorovým vinutím preteká trojfázový prúd, tak ako to už bolo definované. Iný spôsob vytvárania točivého poľa je točením jednosmerného magnetického poľa, čo je prípad synchronného generátora v stave naprázdno. Týmto prípadom sa tu nebudeme zaoberať, pretože patrí k teórii synchronných strojov.

Pri grafickej analýze zmeny smeru otáčania točivého magnetického poľa budeme najskôr napájať každú fázu osobitne a skúmať veľkosť a smer fázora magnetického napätia, magnetickej indukcie, magnetickej intenzity, resp. magnetického poľa, pretože všetky tieto veličiny sú navzájom viazané vzťahmi známymi z teoretickej elektrotechniky (vzťahy pre magnetické napätie budú odvodené v analytickej časti točivého magnetického poľa):

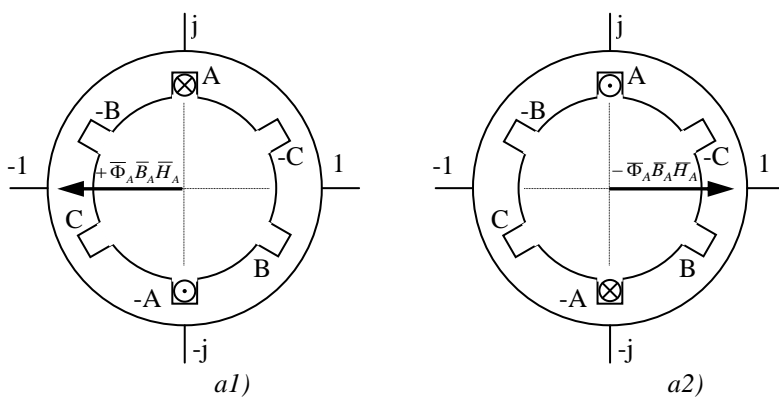
$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad \Phi = BS \quad U_{\text{mag}} \sim Hl \sim Ni$$

Priebeh napájacieho prúdu predpokladáme harmonický a môžeme ho vyjadriť kosínusovou (alebo sínusovou) funkciou času. Budeme sledovať, aké pole (aké veľké a v ktorom smere) sa vytvorí vzhľadom na polohu jednotlivých vinutí, danú súradnicou po obvode vrtania stroja, t. j. po vnútornom obvode statorového zväzku θ a vzhľadom na okamžitú hodnotu napájacieho, čiže magnetizačného prúdu.

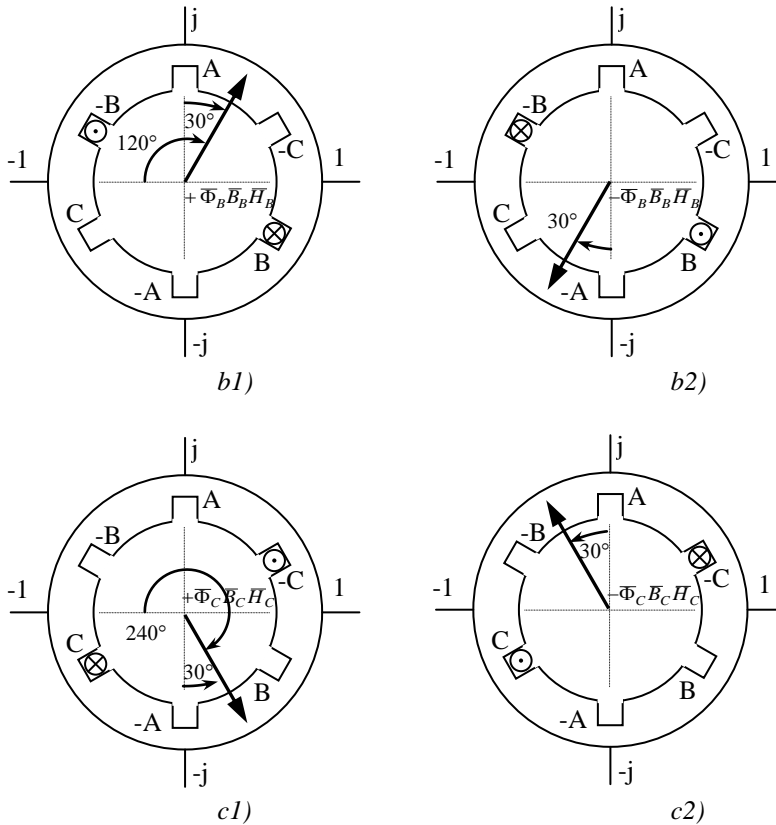
Najprv budeme sledovať smer magnetického poľa, ktoré vytvárajú jednotlivé fázy, ak sú napájané samostatne. Uvidíme, magnetické pole pri napájaní jednej fázy je pulzujúce. Mení veľkosť podľa okamžitej hodnoty prúdu, ale nemení smer (napr. obr. 3.2.15, 3.2.16a, 3.2.18). Na obr.3.2.15 napájame postupne jednotlivé fázy samostatne, pričom meníme polaritu prúdu.

1. Sled fáz A, B, C je v smere hodinových ručičiek:

- Napájame len fázu A, pritom prúd nadobúda a1) kladnú maximálnu hodnotu, ako napr. v okamihu t_1 na obr. 3.2.16b a2) zápornú maximálnu hodnotu, ako napr. v okamihu t_3 na obr.3.2.16b.
- Napájame len fázu B: b1) prúd fázy B je kladný, b2) prúd fázy B je záporný
- Napájame len fázu C: c1) prúd fázy C je kladný, c2) prúd fázy C je záporný



Obr. 3.2.15 Grafická interpretácia magnetického poľa pri samostatnom napájaní jednotlivých fáz, ak sled fáz je v smere hodinových ručičiek, a1) prúd fázy A je kladný, a2) prúd fázy A je záporný

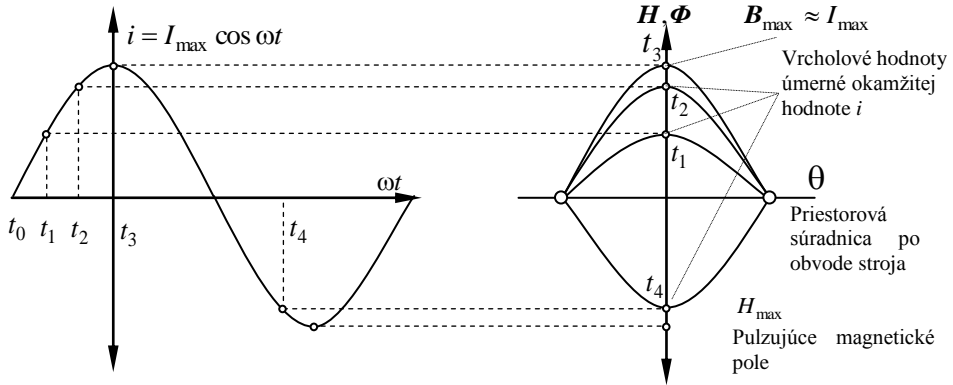


Obr. 3.2.15 Grafická interpretácia magnetického poľa pri samostatnom napájaní jednotlivých fáz, ak sled fáz je v smere hodinových ručičiek, b1) prúd fázy B je kladný, b2) prúd fázy B je záporný, c1) prúd fázy C je kladný, c2) prúd fázy C je záporný

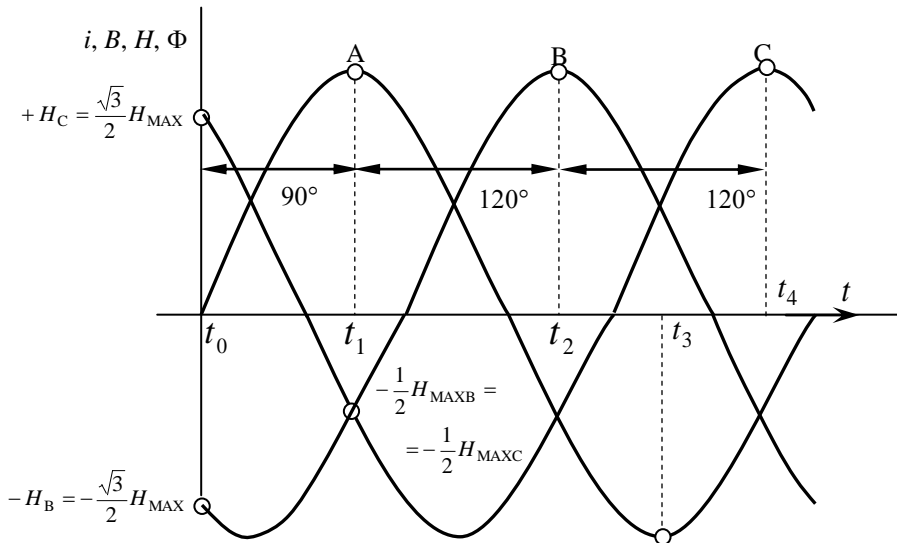
Na obr. 3.2.16a vidno vznik pulzujúceho magnetického poľa pri samostatnom napájaní jednej fázy v závislosti od okamžitej hodnoty prúdu.

Pri súčasnom napájaní všetkých troch fáz dostaneme výsledné magnetické pole vyjadrené pomocou H , B , U_{mag} , alebo Φ tak, že sčítame fázory jednotlivých fáz prislúchajúce jednotlivým okamihom podľa obr. 3.2.15 a 3.2.16b. Napr. na obr. 3.2.17a je výsledné pole pre okamih t_0 , na obr. 3.2.17b v okamihu t_1 atď. Z porovnania obrázkov 3.2.17a,b,c,d vyplýva, že smer točenia magnetického poľa je v smere hodinových ručičiek, rovnako ako sled fáz A, B, C.

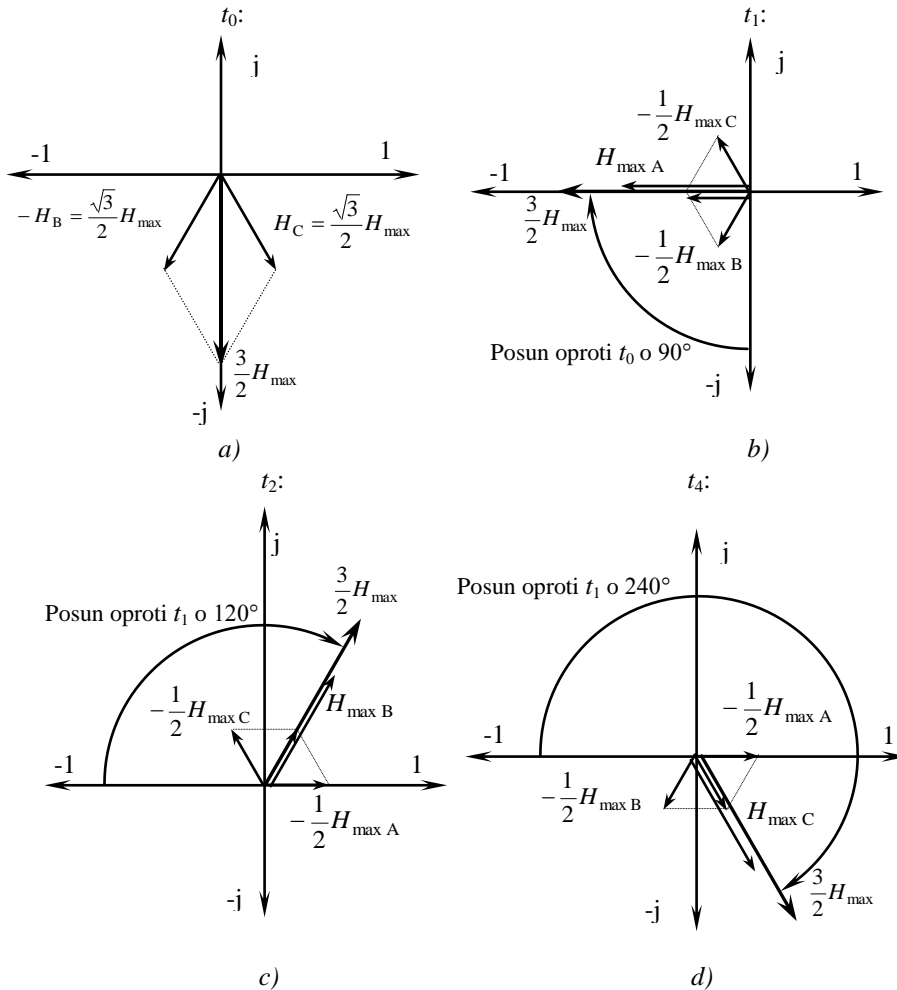
Vznik pulzujúceho magnetického poľa



Obr. 3.2.16a) Vznik pulzujúceho poľa tvaru polvlny v závislosti od priestorovej súradnice po vnútornom obvode statorového zväzku pri samostatnom napájaní jednej fázy



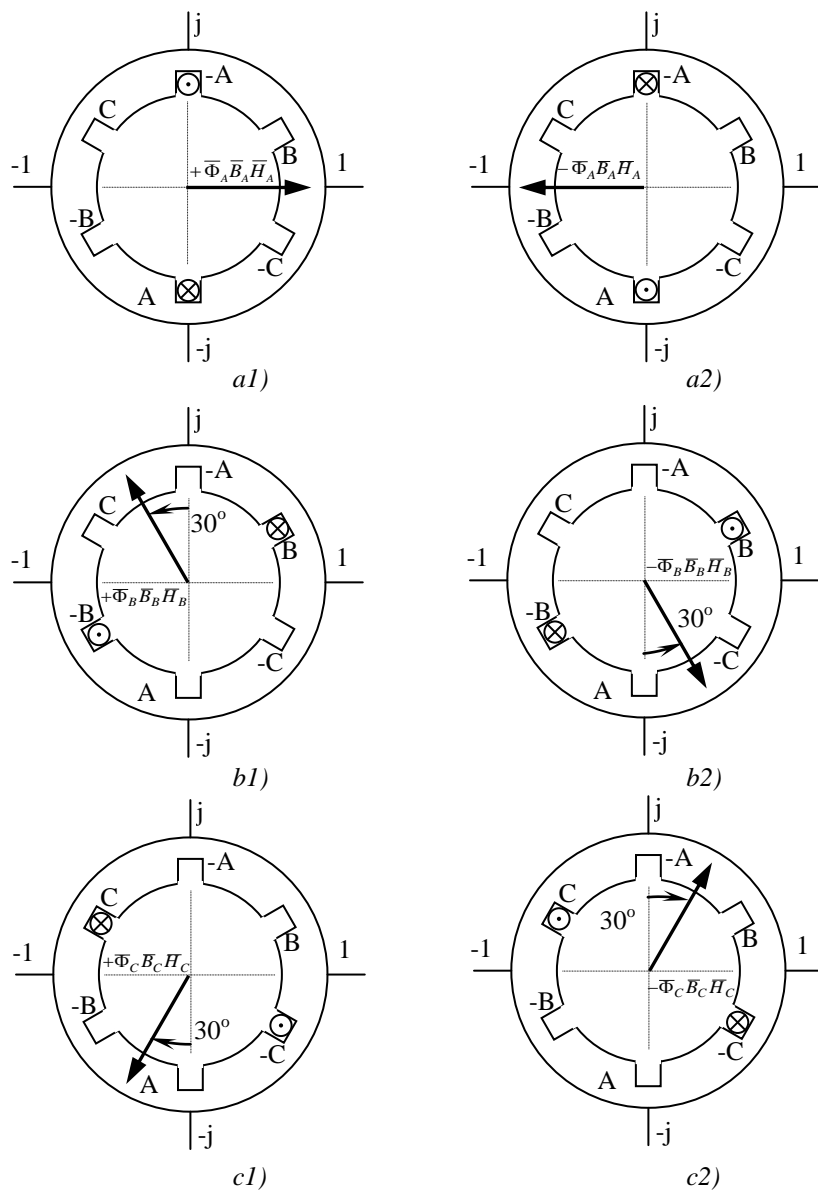
Obr. 3.2.16b) Sinusový priebeh veličín i, B, H, Φ súmernej trojfázovej sústavy



Obr. 3.2.17 Grafická interpretácia vzniku točivého magnetického poľa v jednotlivých okamihoch podľa obr. 3.2.16b a fázorov poľa podľa obr. 3.2.15 (Sled fáz je v smere hodinových ručičiek)

2. Teraz zvolíme sled fáz proti smeru hodinových ručičiek. Jednak vymeníme fázy B a C medzi sebou a jednak vymeníme označenie začiatkov a koncov vinutí, aby sme videli, že od tejto voľby smer točenia poľa nezávisí. Najprv sledujeme smer magnetického poľa, ktoré vytvárajú jednotlivé fázy, ak sú napájané samostatne.

a) Napájame len fázu A, a1) Prúd fázy A je maximálny kladný, ako napr. okamih t_1 na obr. 3.2.16, a2) Prúd fázy A je maximálny záporný, ako napr. okamih t_3 na obr. 3.2.16b. Podobne na obr. b1), b2) napájame len fázu B a na obr. c1), c2) len fázu C.

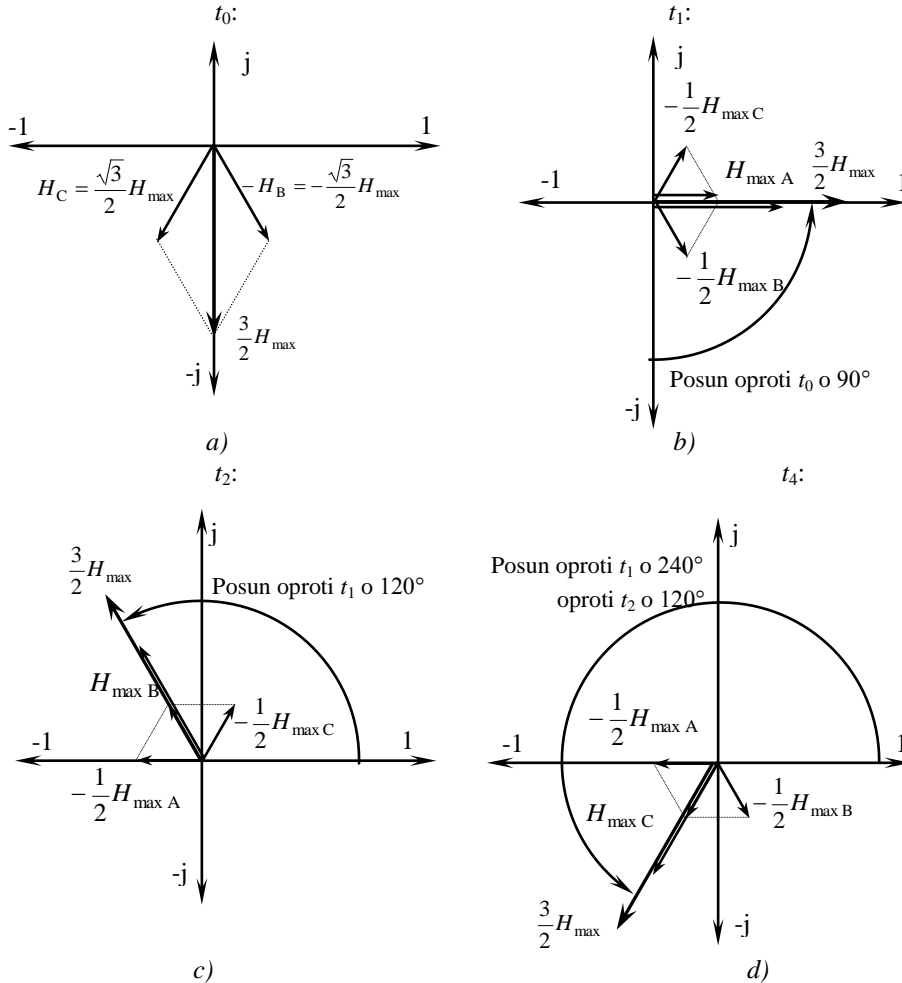


Obr. 3.2.18 Grafická interpretácia smeru magnetického poľa pri samostatnom napájaní jednotlivých fáz, ak sled fáz je proti smeru hodinových ručičiek

Pri súčasnom napájaní všetkých troch fáz dostaneme výsledné magnetické pole pre rôzne časové okamihy tak, že sčítame príspevky od jednotlivých fáz podobne, ako na obr.

3.2.17. Grafická interpretácia pohybu výsledného fázora magnetickej intenzity H_{\max} je na obr. 3.2.19. Vidno, že smer točenia magnetického poľa je proti smeru hodinových ručičiek, rovnako ako sled fáz A, B, C.

Reverzácia, čiže zmena smeru otáčania nastala vzájomnou zámennou dvoch fáz medzi sebou. Tu sme ukázali vzájomnú zmenu fáz B a C. K rovnakému výsledku by sme dospeli pri vzájomnej zámene ľubovoľných dvoch fáz.



Obr. 3.2.19 Grafická interpretácia vzniku točivého magnetického poľa v jednotlivých okamihoch podľa obr. 3.2.18 a 3.2.16b, ak sled fáz je proti smeru hodinových ručičiek.

Z uvedeného grafického riešenia vidno, že v každom okamihu t , všetky tri fázy prispievajú k výslednému fázoru magnetického poľa Φ , (magnetickej intenzity H , magnetickej indukcie B , magnetického napätia U_{mag}) vo vzduchovej medzere v každom

bode θ . Za jednu periódu sa fázor magnetického poľa, (B, H, U_{mag}) posunie opäť do východzej polohy t. j. vykoná 1 otáčku za cyklus (periódu) prúdu v dvojpólovom poli, čiže vznikne točivé magnetické pole, ktoré sa točí synchronnou uhlovou rýchlosťou $\omega_s = 2\pi f_s$, kde f_s je frekvencia napájacieho prúdu. Mechanická uhlová rýchlosť točivého magnetického poľa je p -krát menšia:

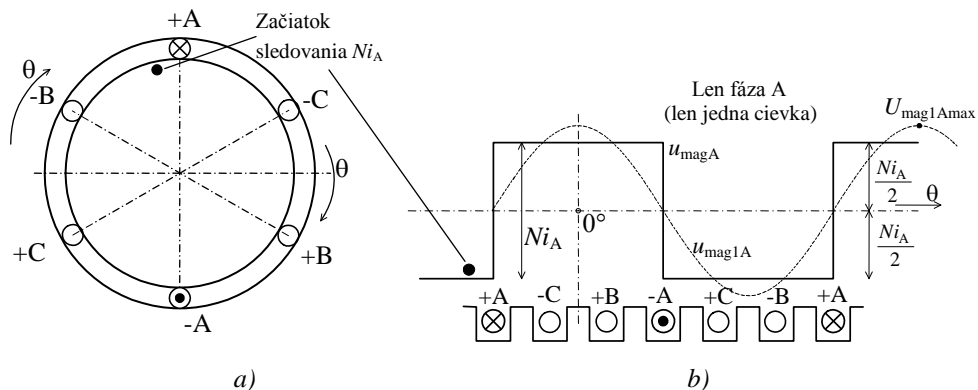
$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

kde p je počet pólových dvojíc.

3.2.10 Priebeh magnetického napätia vo vzduchovej medzere 3-fázového rozloženého vinutia s rovnakým počtom vodičov v drážke, s konečným počtom drážok po obvode stroja

Na nasledujúcich obrázkoch ukážeme, ako sa graficky konštruuje a ako sa mení priebeh magnetického napätia vo vzduchovej medzere podľa toho, v ktorom okamihu sa vyšetruje a aj podľa parametrov vinutia.

Na obr. 3.2.20a) vidíme uloženie vodičov v drážkach statora ak $m=3$, $q=1$, $2p=2$, $Q=6$. Ak predpokladáme, že je napájaná len fáza A (obr.3.2.20a,b), kreslíme priebeh $U_{\text{mag}}=Ni_A$ začínajúc od ľubovoľného miesta napr. pred drážkou +A (označené čiernym bodom).



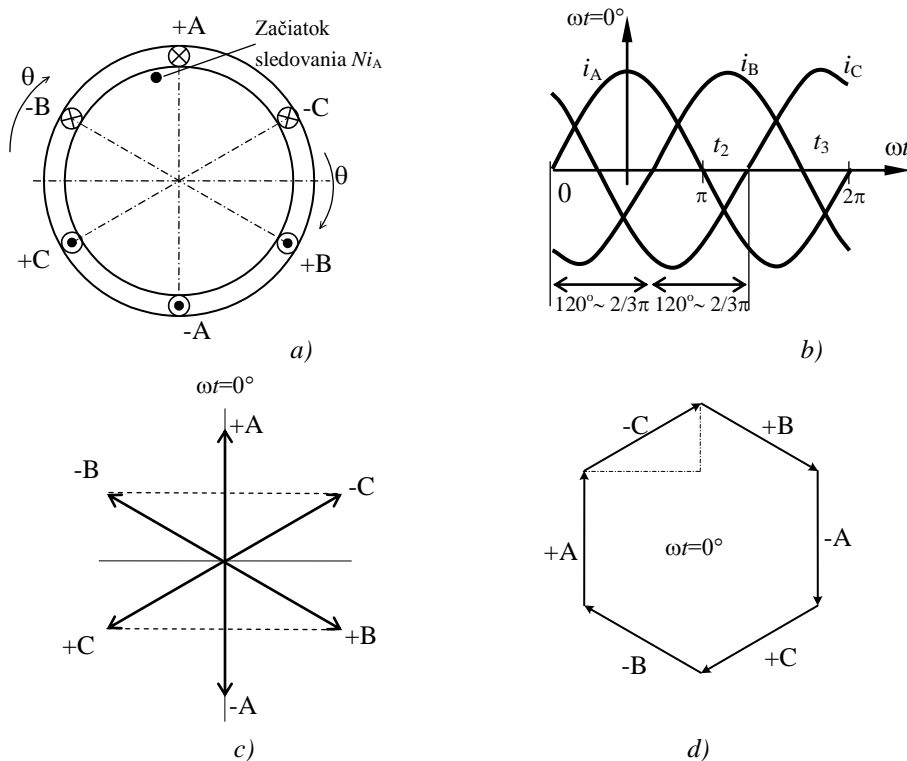
Obr.3.2.20 Grafická konštrukcia magnetického napätia vo vzduchovej medzere, a) uloženie vodičov v drážkach, b) priebeh magnetického napätia ak uvažujeme len napájanie fázy A

Ako vidíme, v drážke +A sa hodnota magnetického napätia zmení o $+Ni_A$ a nebude sa meniť, až kým sa nad drážkou -A nezmení táto hodnota o $-Ni_A$, atď. Tým sa vytvorí obdĺžnikový priebeh vlny, ktorú po Fourierovej analýze rozložíme na základnú a harmonické zložky. Základná harmonická má amplitúdu

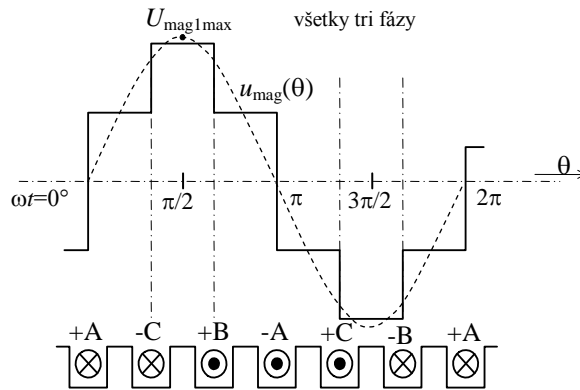
$$U_{\text{mag}1A \text{ max}} = \frac{4 Ni_A}{\pi 2},$$

ako uvidíme v kapitole 3.3.

Teraz sledujme priebeh magnetického napätia ak sú napájané všetky tri fázy. Na obr.3.2.21a) sú smery prúdov dané okamihom $\omega t = 0$, kedy je vo fáze A $+I_{\text{max}}$, vo fázach B a C sú polovičné záporné hodnoty, ako vidno aj na priebehu okamžitých hodnôt prúdov (obr.3.2.21b) a na fázorovom diagrame na obr.3.2.21c). Stupňovitý priebeh magnetického napätia je na obr. 3.2.21e), kde jednotlivé stupne sú vytvorené úsečkami získanými priemetom fázorov do osi pre $\omega t = 0$ na diagrame 3.2.21c v poradí za sebou nasledujúcich drážok. V takomto poradí s príslušnými smermi fázorov nakreslíme aj Göergesov diagram, obr.3.2.21d). Göergesov diagram je mnohouholník budení jednotlivých cievkových strán vytvorený fázorovým súčtom ich maximálnych hodnôt v poradí, v akom nasledujú po obode stroja. Ideálne je také vinutie, ktoré vybudí magnetické pole čo najbližšie sínusoida a tvarovo sa čo najmenej mení, teda také, ktorého Göergesov diagram je čo najbližší kružnici.

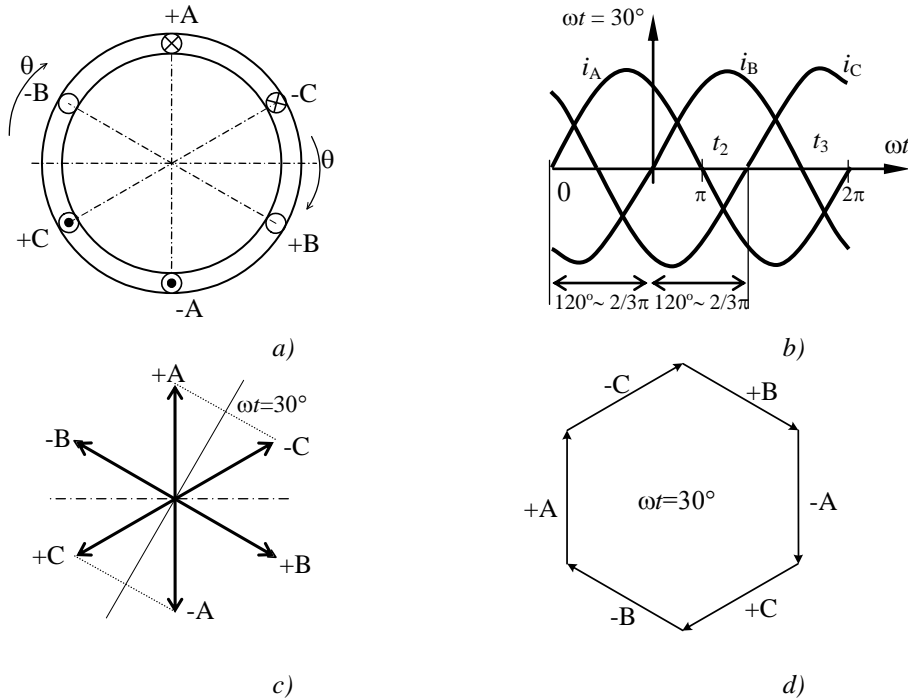


Obr.3.2.21 Analýza magnetického napätia pri trojfázovom napájaní ak ($\omega t = 0^\circ$) a) uloženie vodičov v drážkach, b) priebeh okamžitých hodnôt prúdov, c) fázorový diagram, d) Göergesov diagram

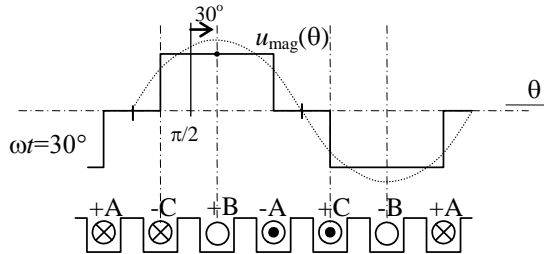


Obr.3.2.21 e) stupňovitý priebeh magnetického napätia ($\omega t = 0^\circ$),

Na obr.3.2.22 je postupne zobrazené uloženie vodičov v drážkach, okamžitý priebeh prúdov, fázorový diagram, Göergesov diagram a tvar vlny magnetického napätia a pre okamih $\omega t = 30^\circ$. Vidíme, že tvar vlny sa značne zmenil, hodnoty U_{mag} , B_δ , H_δ sa menia.



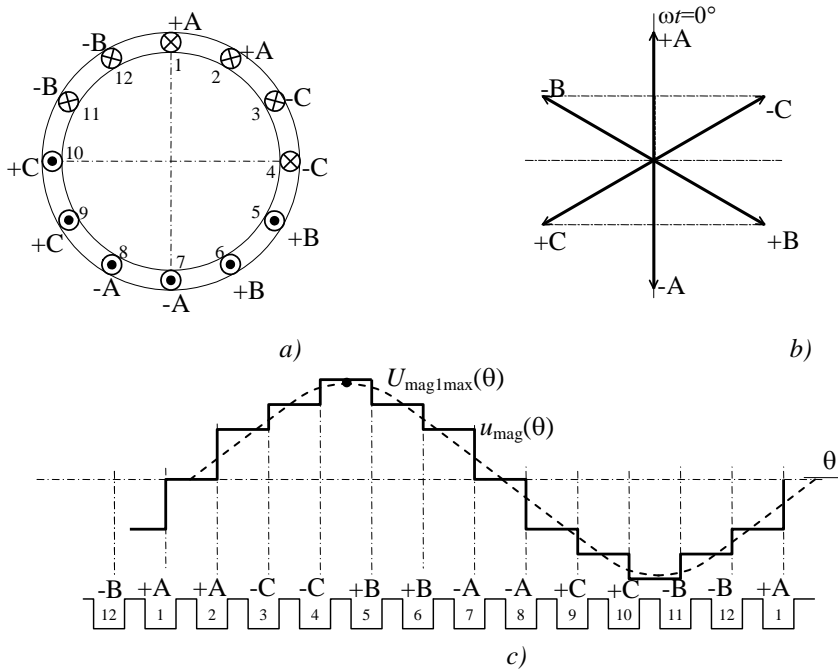
Obr.3.2.22 Analýza magnetického napätia pri trojfázovom napájaní ak ($\omega t = 30^\circ$) a) uloženie vodičov v drážkach, b) priebeh okamžitých hodnôt prúdov, c) fázorový diagram, d) Göergesov diagram



Obr.3.2.22 e) stupňovitý priebeh magnetického napätia ($\omega t = 30^\circ$) (obrázky nie sú kreslené v mierke, sú len ilustračné)

Pri porovnaní priebehov základnej harmonickej na obr.3.2.21e) a na obr.3.2.22e) vidíme, že poloha amplitúdy sa posunula o 30° , čiže o toľko, o koľko sa posunul časový priebeh sínusových prúdov. Posunutie maxima dokumentuje postupné točenie magnetického póla.

Na obr.3.2.23 je ukážka umiestnenia fáz, fázorový diagram a tvar vlny pre $\omega t = 0$ v prípade, že $m = 3, q = 2, 2p = 2, Q = 12$. Vidíme, že tvar vlny je bližší sínusoide.



Obr.3.2.23 a) Ukážka umiestnenia fáz, b) fázorový diagram, c) tvar vlny pre $\omega t = 0$ v prípade, že $m = 3, q = 2, 2p = 2, Q = 12$.

V kapitole 3.3 odvodíme analytický výraz, ktorým opíšeme magnetické napätie vo vzduchovej medzere elektrického stroja, magnetický tok, magnetickú indukciu a intenzitu magnetického poľa ako funkcie priestoru a času.

RIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 3.2.1

Vypočítajte koeficient vinutia k_v pre dvojvrstvové vinutie trojfázového dvojpólového synchronného stroja, ktorý má po obvode 12 drážok a cievkový krok $Y = 5$.

Riešenie:

Počet drážok na pól a fázu ak $Q = 12$, $m = 3$, $2p = 2$ je

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 3 \cdot 3} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2$$

Koeficient rozloženia pre trojfázové vinutie

$$k_d = \frac{1}{2q \sin \frac{30}{q}} = \frac{1}{2 \cdot 2 \sin \frac{30}{2}} = 0,966$$

Počet drážok na pól, čiže pólový rozstup vyjadrený počtom drážok

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

Ak je krok 5, znamená to, že je skráteneý a treba vypočítať koeficient kroku:

$$k_p = \sin \left(\frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2} \right) = \sin \left(\frac{5}{6} 90^\circ \right) = 0,9659$$

Koeficient vinutia potom je

$$k_v = k_d k_p = 0,966 \cdot 0,9659 = 0,932$$

Príklad 3.2.2

Vypočítajte indukované napätie jednej fázy štvorpólového trojfázového synchronného stroja s priemerom kotvy (vrtania) $d = 0,3$ m, dĺžkou $l_{Fe} = 0,5$ m. Základná harmonická magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere má maximálnu hodnotu $B_{\max} = 0,6$ T. Rýchlosť otáčania $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, počet drážok stroja $Q = 36$. Vinutie je jednovrstvové, v každej drážke sú štyri vodiče.

Riešenie:

Efektívnu hodnotu jednej fázy indukovaného napätia vypočítame podľa vzťahu

$$U_{if} = \sqrt{2} \pi f \Phi_{str} N k_v$$

Frekvenciu indukovaného napätia určíme zo vzťahu

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Počet závitov N určíme zo vzťahu pre počet vodičov v drážke

$$\frac{N}{pq} = 4 \Rightarrow N = 4pq = 4 \cdot 2 \cdot 3 = 24$$

pričom počet drážok na pól a fázu

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3$$

Na výpočet indukovaného napätia potrebujeme strednú hodnotu magnetického toku jedného pólu :

$$\Phi_{str} = \frac{2}{\pi} B_{max} \tau_p I_{Fe} = \frac{2}{\pi} 0,6 \cdot 0,236 \cdot 0,5 = 0,045 \text{ Wb}$$

kde plocha, ktorou magnetický tok prestupuje, je daná $\tau_p I_{Fe}$, pričom pólový rozstup τ_p je:

$$\tau_p = \frac{\pi d}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,3}{4} = 0,236 \text{ m}$$

Koeficient vinutia je daný vo všeobecnosti súčinom $k_v = k_d k_p$, ale pretože vinutie je jednovrstvové, vinutie má plný krok a $k_p = 1$. Preto počítame len koeficient rozloženia vinutia:

$$k_d = \frac{1}{2q \sin \frac{30}{q}} = \frac{1}{2 \cdot 3 \sin \frac{30}{3}} = 0,96$$

Efektívna hodnota indukovaného napätia jednej fázy potom je:

$$U_{if} = \sqrt{2} \pi f \Phi_{str} N k_d = \sqrt{2} \pi \cdot 50 \cdot 24 \cdot 0,045 \cdot 0,96 = 230 \text{ V}$$

Príklad 3.2.3

Dvoj pólový turboalternátor má na statore trojfázové dvojvrstvé vinutie uložené v 72 drážkach po dvoch vodičoch s krokom 29/36 póloveho rozstupu. Vŕtanie statora $d = 82$ cm, dĺžka $l_{\text{Fe}} = 173$ cm. Vypočítajte základnú harmonickú napätia fázy statora, ak amplitúda základnej harmonickej magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere je $B_{\text{max}} = 0,94$ T a rýchlosť otáčania je 3000 min^{-1} .

Riešenie:

Veľkosť indukovaného napätia určíme zo vzťahu

$$U_{\text{if}} = \sqrt{2} \pi f \Phi_{\text{str}} N k_v$$

Frekvencia indukovaného napätia je

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 3000}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Pólový rozstup

$$\tau_p = \frac{\pi d}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,82}{2} = 1,288 \text{ m}$$

Stredná hodnota magnetickeho toku

$$\Phi_{\text{str}} = \frac{2}{\pi} B_{\text{max}} \tau_p l_{\text{Fe}} = \frac{2}{\pi} 0,94 \cdot 1,288 \cdot 1,73 = 1,33 \text{ Wb}$$

Počet drážok na pól a fázu

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

Počet závitov N určíme z počtu vodičov v jednej drážke

$$\frac{N}{pq} = 2 \Rightarrow N = 2pq = 2 \cdot 1 \cdot 12 = 24.$$

Keďže vinutie je dvojvrstvé a cievka má skrátený krok $Y = 29$, budeme počítať koeficient rozlohy aj koeficient kroku

$$k_d = \frac{1}{2q \sin \frac{30}{q}} = \frac{1}{2 \cdot 12 \sin \frac{30}{12}} = 0,955$$

$$k_p = \sin\left(\frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{29}{36} 90^\circ\right) = 0,953$$

keďže plný krok je:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{72}{2} = 36$$

Činiteľ vinutia

$$k_v = k_d k_p = 0,955 \cdot 0,953 = 0,91$$

Indukované napätie jednej fázy statora je

$$U_{if} = \sqrt{2}\pi f \Phi_{str} N k_v = \sqrt{2}\pi \cdot 50 \cdot 1,33 \cdot 24 \cdot 0,91 = 6454 \text{ V}$$

Príklad 3.2.4

Stator štvorpólového asynchrónneho motora má priemer vŕtania (kotvy) $d = 20$ cm, dĺžku kotvy $l_{Fe} = 15$ cm a 36 drážok, v ktorých je uložené dvojvrstvé vinutie s cievkovým krokom 6. Pre fázové napätie 220 V, 50 Hz, je amplitúda magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere 0,75 T.

Vypočítajte počet vodičov v jednej drážke za predpokladu, že úbytok na rozptylovej reaktancii statora je zanedbateľný.

Riešenie:

Počet vodičov v drážke môžeme vypočítať zo vzťahu $N/(pq)$. Potrebujeme teda určiť počet drážok na pól a fázu q a počet do série zapojených závitov v jednej fáze vinutia N .

Počet drážok na pól a fázu

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3$$

Počet závitov vypočítame zo vzťahu pre indukované napätie

$$U_{if} = \sqrt{2}\pi f \Phi_{str} N k_v$$

a z toho počet závitov je

$$N = \frac{U_{if}}{\sqrt{2}\pi f \Phi_{str} k_v}$$

Pretože úbytok napätia na rozptylovej reaktancii statora môžeme zanedbať, považujeme svorkové napätie 220 V za napätie indukované.

Stredná hodnota magnetického toku

$$\Phi_{\text{str}} = \frac{2}{\pi} B_{\text{max}} \tau_p I_{\text{Fe}} = \frac{2}{\pi} 0,75 \cdot 0,157 \cdot 0,15 = 0,0112 \text{ Wb}$$

kde pólový rozstup

$$\tau_p = \frac{\pi d}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,2}{4} = 0,157 \text{ m}$$

Keďže vinutie je dvojrvtvové a cievka má skráteneý krok $6/9\tau_p$, musíme počítať koeficient rozloženia vinutia i koeficient kroku.

$$k_d = \frac{1}{2q \sin \frac{30}{q}} = \frac{1}{2 \cdot 3 \sin \frac{30}{3}} = 0,96$$

$$k_p = \sin \left(\frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2} \right) = \sin \left(\frac{6}{9} 90^\circ \right) = 0,866$$

pretože

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

Koeficient vinutia

$$k_v = k_d k_p = 0,96 \cdot 0,866 = 0,831$$

Počet závitov

$$N = \frac{220}{\sqrt{2} \pi \cdot 50 \cdot 0,0112 \cdot 0,831} = 106,4 \text{ závitov}$$

a počet vodičov v drážke

$$\frac{N}{pq} = \frac{106,4}{2 \cdot 3} = 17,73 \cong 18 \text{ vodičov v drážke, takže počet závitov je } N = 18 \cdot 2 \cdot 3 = 108$$

a indukované napätie by bolo 223 V .

Príklad 3.2.5

Vypočítajte amplitúdu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere štvorpólového trojfázového synchronného stroja s priemerom kotvy $d = 30 \text{ cm}$ a dĺžkou $l_{\text{Fe}} = 50 \text{ cm}$, ak

otáčavá rýchlosť stroja je $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Dvojvrstvové vinutie je uložené v 36 drážkach s cievkovým krokom $7/9$ pólového rozstupu tak, že v každej drážke sú 4 vodiče. Efektívna hodnota indukovaného napätia jednej fázy statora je 230 V.

Riešenie:

Na výpočet magnetickej indukcie použijeme vzťah pre indukované napätie, odkiaľ získame hodnotu magnetického toku

$$\Phi_{\text{str}} = \frac{U_{\text{if}}}{\sqrt{2}\pi f N k_v}$$

a na to budeme potrebovať frekvenciu indukovaného napätia, počet závitov a koeficient vinutia:

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Počet závitov N určíme z údajov o počte vodičov v drážke

$$\frac{N}{pq} = 4 \Rightarrow N = 4 \cdot pq = 4 \cdot 2 \cdot 3 = 24 \text{ závitov}$$

pretože

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3$$

Vypočítame činiteľ vinutia, pričom koeficient rozloženia vinutia je

$$k_d = \frac{1}{2q \sin \frac{30}{q}} = \frac{1}{2 \cdot 3 \sin \frac{30}{3}} = 0,959$$

a koeficient kroku

$$k_p = \sin \left(\frac{Y}{Q_p} \frac{\pi}{2} \right) = \sin \left(\frac{7}{9} 90^\circ \right) = 0,939$$

Koeficient vinutia je

$$k_v = k_d k_p = 0,959 \cdot 0,939 = 0,901$$

Teraz môžeme určiť strednú hodnotu magnetického toku

$$\Phi_{\text{str}} = \frac{230}{\sqrt{2}\pi 50 \cdot 24 \cdot 0,901} = 0,0479 \text{ Wb}$$

Amplitúda magnetickej indukcie potom je

$$B_{\max} = \frac{\pi}{2} B_{\text{str}} = \frac{\pi}{2} \frac{\Phi_{\text{str}}}{\frac{\pi d}{2p} l_{\text{Fe}}} = \frac{\pi}{2} \frac{0,0479}{\frac{\pi \cdot 0,3}{4} \cdot 0,5} = 0,63 \text{ T}$$

Príklad 3.2.6

Stator štvorpólového trojfázového asynchrónneho motora má 36 drážok a je pripojený na napätie 3x380/220 V, 50 Hz. Priemer vrtania kotvy $d = 20$ cm, dĺžka $l_{\text{Fe}} = 15$ cm. Do drážok statora je uložené dvojvrstvé vinutie. Okrem toho do dvoch drážok statora bola vložená pomocná cievka so štyrmi závitmi a plnom cievkovom kroku. Pri chode naprázdno bolo na vývodoch pomocnej cievky namerané napätie 8,4 V.

Vypočítajte amplitúdu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere za predpokladu, že úbytok na pomocnej cievke zanedbáme.

Riešenie:

Pre výpočet magnetickej indukcie použijeme vzťah pre indukované napätie, pričom je výhodné použiť všetky údaje o pomocnej cievke. Je to totiž len jedna cievka, uložená len v dvoch drážkach, vzdialených od seba τ_p . Takže cievka nie je rozložená po obvodě a v tomto špeciálnom prípade koeficient rozloženia vinutia $k_{\text{dc}} = 1,0$. A pretože cievka má plný krok, je aj koeficient kroku $k_{\text{pc}} = 1,0$ a preto aj $k_{\text{vc}} = 1,0$. Preto výpočet bude oveľa jednoduchší, než bol v príklade 3.2.

Stredná hodnota magnetického toku

$$\Phi_{\text{str}} = \frac{U_c}{\sqrt{2}\pi f N_c k_{\text{vc}}} = \frac{8,4}{\sqrt{2}\pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot 1,0} = 0,00945 \text{ Wb}$$

Maximálna hodnota magnetickej indukcie je

$$B_{\max} = \frac{\pi}{2} B_{\text{str}} = \frac{\pi}{2} \frac{\Phi_{\text{str}}}{\frac{\pi d}{2p} l_{\text{Fe}}} = \frac{\pi}{2} \frac{0,00945}{\frac{\pi \cdot 0,2}{4} \cdot 0,15} = 0,63 \text{ T}$$

Príklad 3.2.7

A. Vypočítajte koeficient rozloženia vinutia pre stroj s 9 drážkami na pól pre tieto prípady:

- Vo všetkých drážkach je uložené jedno vinutie (t. j. jedno vinutie zaberá celý pólový rozstup, čiže 180° pólového rozstupu τ_p)
- V prvých dvoch tretinách pólového rozstupu (t. j. na $120^\circ \tau_p$, resp. v 6 drážkach z 9) je uložené jedno vinutie

c) Tri rovnaké vinutia sú uložené v drážkach pólového rozstupu, t. j. jedno vinutie zaberá 60° , resp. 3 drážky z $Q_p = 9$.

B. Pre prípad c) tohto príkladu vypočítajte koeficient rozloženia vinutia pre 5., 17., a 19. harmonickú.

Riešenie:

A. Daný je počet drážok na pól $Q_p = \frac{Q}{2p} = 9$ a najprv treba vypočítať uhol α_d .

Vo všetkých prípadoch

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q} = \frac{360^\circ \cdot 2p}{2Q} = \frac{180^\circ}{Q_p} = \frac{180^\circ}{9} = 20^\circ.$$

Koeficient rozloženia vinutia je daný vzťahom:

$$k_d = \frac{\sin q \frac{\alpha_d}{2}}{q \sin \frac{\alpha_d}{2}}$$

kde q je počet drážok na pól a fázu, resp. na pól a jedno vinutie. Teda q pre prípad a) je $q = 9$, pre prípad b) $q = 6$ a pre prípad c) $q = 3$.

Potom

$$\text{a) } k_d = \frac{\sin 9 \frac{20^\circ}{2}}{9 \sin \frac{20^\circ}{2}} = 0,64 \quad \text{b) } k_d = \frac{\sin 6 \frac{20^\circ}{2}}{6 \sin \frac{20^\circ}{2}} = 0,831 \quad \text{c) } k_d = \frac{\sin 3 \frac{20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{20^\circ}{2}} = 0,96$$

Výsledky dosiahnuté v a), b), c) poukazujú na dôvod, prečo sa odporúča použiť 3-fázové vinutie so šiestimi skupinami cievok po 60° na pólový pár, namiesto jedného vinutia. Koeficient rozloženia vinutia, a teda aj napätia a výkonu tých istých vodičov sa zvýši zo 64 na 96 %.

B. Pre ν -tú harmonickú je koeficient rozloženia vinutia

$$k_{d\nu} = \frac{\sin q \frac{\nu \alpha_d}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha_d}{2}}$$

Potom pre zadané vyššie harmonické je koeficient rozloženia vinutia nasledujúci:

$$k_{d5} = \frac{\sin 3 \frac{5 \cdot 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{5 \cdot 20^\circ}{2}} = 0,218 \quad k_{d17} = \frac{\sin 3 \frac{17 \cdot 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{17 \cdot 20^\circ}{2}} = 0,96 \quad k_{d19} = \frac{\sin 3 \frac{19 \cdot 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{19 \cdot 20^\circ}{2}} = 0,96$$

Vidíme, že 17. a 19. harmonická majú opäť vysoký koeficient rozloženia vinutia, ak sú použité rovné drážky. Možno ich značne zredukovať zošíkmením drážok o jeden drážkový rozstup. Ak dosadíme koeficient zošíkmenia do výrazu pre koeficient rozloženia vinutia, ten nadobudne tvar

$$k_{d\nu\text{š}} = \frac{\sin \nu \frac{\alpha_d}{2}}{\nu \frac{\alpha_d}{2}}$$

kde α_d v menovateli má byť v elektrických radiánoch, resp. ak je v elektrických stupňoch, treba menovateľ vynásobiť $\pi/180^\circ$.

Ak teda uvažujeme zošíkmenie drážok o 1 drážkový rozstup, potom koeficienty pre jednotlivé harmonické sú:

$$k_{d5\text{š}} = \frac{\sin 3 \cdot 5 \cdot 10^\circ}{3 \cdot 5 \cdot 10^\circ \cdot \pi / 180^\circ} = 0,191,$$

$$k_{d17\text{š}} = \frac{\sin 3 \cdot 17 \cdot 10^\circ}{3 \cdot 17 \cdot 10^\circ \cdot \pi / 180^\circ} = 0,056,$$

$$k_{d19\text{š}} = \frac{\sin 3 \cdot 19 \cdot 10^\circ}{3 \cdot 19 \cdot 10^\circ \cdot \pi / 180^\circ} = 0,05.$$

Tieto výsledky dostatočne ilustrujú význam zošíkmenia drážok pri potláčaní priestorových harmonických zložiek.

Výpočet môžeme urobiť aj tak, že vypočítame zvlášť koeficient zošíkmenia pre harmonické zložky $k_{\text{š}\nu}$ a výsledný efekt dostaneme, keď vynásobíme pôvodný koeficient rozloženia vinutia koeficientom zošíkmenia.

Pre 5-harmonickú koeficient zošíkmenia bude:

$$k_{\text{š}5} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}}{\nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}} = \frac{\sin 5 \frac{\pi}{2} \frac{1}{3 \cdot 3}}{5 \frac{\pi}{2} \frac{1}{3 \cdot 3}} = 0,877$$

a spolu s koeficientom rozloženia dostaneme výsledný koeficient:

$$k_{d\text{š}5} = k_{d5} k_{\text{š}5} = 0,218 \cdot 0,877 = 0,191.$$

Podobne vypočítame koeficienty zošíkmenia pre zvyšné dve harmonické: Pri výpočte v stupňoch:

$$k_{\text{š}17} = \frac{\sin(\nu 90^\circ \frac{1}{mq})}{\nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}} = \frac{\sin(17 \cdot 90^\circ \frac{1}{3 \cdot 3})}{17 \frac{\pi}{2} \frac{1}{3 \cdot 3}} = 0,058$$

alebo pri výpočte v radiánoch:

$$k_{s17} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}}{\nu \frac{\pi}{2} \frac{1}{mq}} = \frac{\sin 17 \frac{\pi}{2} \frac{1}{3 \cdot 3}}{17 \frac{\pi}{2} \frac{1}{3 \cdot 3}} = 0,058$$

$$k_{ds17} = k_{d17} k_{s17} = 0,96 \cdot 0,058 = 0,056$$

$$k_{s19} = 0,052$$

$$k_{ds19} = k_{d19} k_{s19} = 0,96 \cdot 0,052 = 0,0502$$

Dostali sme rovnaké výsledky ako priamym výpočtom koeficienta k_{ds} , ktorý sme už uviedli.

Príklad 3.2.8

Striedavý stroj má 18 drážok na 1 pól. Prvá cievka je uložená v drážkach 1 a 16. Vypočítajte koeficient kroku pre 1., 5. a 7. harmonickú.

Riešenie:

Uhol medzi napätiami dvoch drážok je

$$\alpha_d = \frac{360^\circ p}{Q} = \frac{180^\circ}{Q_p} = \frac{180^\circ}{18} = 10^\circ$$

Plný krok by bol $Q_p = 18$ a cievka by ležala v drážkach 1 a 19. Teraz má cievka skrátený krok $Y = 15$, lebo cievka je uložená v drážkach 1 a 16.

Koeficient kroku pre základnú harmonickú:

$$k_{p1} = \sin \frac{Y}{Q_p} 90^\circ = \sin \frac{15}{18} 90^\circ = 0,966$$

a pre 5-tu a 7-mu harmonickú:

$$k_{p5} = \sin \nu \frac{Y}{Q_p} 90^\circ = \sin 5 \frac{15}{18} 90^\circ = 0,259$$

$$k_{p7} = \sin \nu \frac{Y}{Q_p} 90^\circ = \sin 7 \frac{15}{18} 90^\circ = 0,259$$

Príklad 3.2.9

Magnetické pole tvorené 3-fázovým, 50 Hz, 600 min⁻¹ alternátorom má priestorové rozloženie magnetickej indukcie dané výrazom

$$B = B_{1\max} \sin \vartheta + B_{3\max} \sin 3\vartheta + B_{5\max} \sin 5\vartheta = \sin \vartheta + 0,3 \sin 3\vartheta + 0,2 \sin 5\vartheta \quad [\text{T}].$$

Alternátor má 180 drážok, vinutie je dvojvrstvové, každá cievka má 3 závitov a obopína 15 drážok, pritom cievky tvoria 60° skupinu. Priemer kotvy je 125 cm a dĺžka železa (kotvy) je 45 cm.

Vypočítajte:

Efektívnu hodnotu indukovaného napätia

- v jednom vodiči pre 1., 3. a 5. harmonickú
- v jednej cievke pre 1., 3. a 5. harmonickú
- v jednej fáze pre 1., 3. a 5. harmonickú.
- Napíšte výraz pre okamžitú hodnotu indukovaného napätia pre a) b) c), v prípade c) efektívnu hodnotu fázového aj združeného napätia.

Riešenie:

Počet pólov alternátora vypočítame zo vzťahu pre frekvenciu

$$f = \frac{pn}{60} \Rightarrow p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{600} = 5,$$

takže počet pólov je

$$2p = 10.$$

Plocha pólového rozstupu je

$$S = \tau_p l_{\text{Fe}} = \frac{\pi d}{2p} l_{\text{Fe}} = \frac{\pi \cdot 1,25}{10} \cdot 0,45 = 0,1765 \text{ m}^2.$$

Zo vzťahu pre okamžitú hodnotu magnetickej indukcie vyplýva, že $B_{1\max} = 1 \text{ T}$, $B_{3\max} = 0,3 \text{ T}$ a $B_{5\max} = 0,2 \text{ T}$.

Základná harmonická magnetického poľa na τ_p potom je

$$\Phi_{1\text{str}} = \frac{2}{\pi} B_{1\max} S = \frac{2}{\pi} \cdot 1 \cdot 0,1765 = 0,1122 \text{ Wb}.$$

- Efektívna hodnota indukovaného napätia základnej harmonickej v jednom vodiči je

$$U_{i\text{v}1} = \frac{\pi f_1 \Phi_{1\text{str}}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 0,1122}{\sqrt{2}} = 12,5 \text{ V}$$

a jeho maximálna hodnota

$$U_{i\text{v}1\max} = \sqrt{2} \cdot 12,5 = 17,62 \text{ V}$$

Indukované napätia harmonických zložiek v jednom vodiči sú úmerné amplitúdam magnetických indukcií podľa pomeru:

$$\frac{U_{iv0}}{U_{iv1}} = \frac{\pi f_U \Phi_{Ustr} / \sqrt{2}}{\pi f_1 \Phi_{1str} / \sqrt{2}} = \frac{v f_1 \frac{\tau_{p1}}{v} I_{Fe} B_{Umax}}{f_1 \tau_{p1} I_{Fe} B_{1max}} = \frac{B_{Umax}}{B_{1max}}$$

Potom

$$U_{iv3max} = 0,3 \cdot 17,62 = 5,28 \text{ V}$$

$$U_{iv5max} = 0,2 \cdot 17,62 = 3,52 \text{ V}$$

Okamžitá hodnota indukovaného napätia vo vodiči, ak t meriame od nuly má výraz:

$$u_{iv} = 17,62 \sin \omega t + 5,28 \sin 3\omega t + 3,52 \sin 5\omega t$$

b) Počet drážok na pól $Q_p = \frac{180}{10} = 18$, čo by bol plný krok cievky. Zadaný je skrátený krok $Y = 15$, takže koeficient kroku pre jednotlivé harmonické je:

$$k_{p1} = \sin \frac{Y}{Q_p} 90^\circ = \sin \frac{15}{18} 90^\circ = 0,966$$

$$k_{p3} = \sin 3 \frac{Y}{Q_p} 90^\circ = \sin 3 \cdot \frac{15}{18} 90^\circ = -0,707$$

$$k_{p5} = \sin 5 \frac{Y}{Q_p} 90^\circ = \sin 5 \cdot \frac{15}{18} 90^\circ = 0,259$$

V prípade k_p znamienko + alebo - nemá praktický význam. Súvisí však s fázovým uhlom harmonickej výsledného indukovaného napätia, ako uvidíme neskôr. Pretože každá cievka má 3 závitov, t. j. 6 vodičov, bude indukované napätie každej cievky 6x väčšie ako v jednom vodiči, ale redukované koeficientom kroku príslušnej harmonickej:

$$U_{ic1max} = 6 \cdot 17,62 \cdot 0,966 = 102,1 \text{ V}$$

$$U_{ic3max} = 6 \cdot 5,28 \cdot (-0,707) = -22,39 \text{ V}$$

$$U_{ic5max} = 6 \cdot 3,52 \cdot 0,259 = 5,47 \text{ V}$$

Okamžitá hodnota indukovaného napätia cievky, ak t meriame od nuly má výraz

$$u_{ic} = 102,12 \sin \omega t - 22,39 \sin 3\omega t + 5,47 \sin 5\omega t$$

c) Na výpočet napätia celej fázy treba aj koeficient rozloženia vinutia. Na ten potrebujeme počet drážok na pól a fázu

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{180}{10 \cdot 3} = 6$$

a uhol medzi napätiami dvoch drážok

$$\alpha_d = \frac{p \cdot 360^\circ}{Q} = \frac{5 \cdot 360^\circ}{180} = 10^\circ.$$

Teraz vypočítame koeficient rozloženia vinutia pre každú harmonickú:

$$k_{d1} = \frac{\sin q \cdot \frac{\alpha_d}{2}}{q \sin \frac{\alpha_d}{2}} = \frac{\sin 6 \cdot \frac{10^\circ}{2}}{6 \sin \frac{10^\circ}{2}} = 0,955$$

$$k_{d3} = \frac{\sin 3 \cdot \frac{\alpha_d}{2}}{q \sin 3 \cdot \frac{\alpha_d}{2}} = \frac{\sin 3 \cdot 6 \cdot \frac{10^\circ}{2}}{6 \sin 3 \cdot \frac{10^\circ}{2}} = 0,643$$

$$k_{d5} = \frac{\sin 5 \cdot \frac{\alpha_d}{2}}{q \sin 5 \cdot \frac{\alpha_d}{2}} = \frac{\sin 5 \cdot 6 \cdot \frac{10^\circ}{2}}{6 \sin 5 \cdot \frac{10^\circ}{2}} = 0,197$$

Celkový počet cievok v 180 drážkach pri dvojvrstvovom vinutí je 180 a počet cievok na fázu je $180/3 = 60$, preto indukované napätie jednej fázy pre jednotlivé harmonické vypočítame takto (k_p je zahrnutý vo výpočte napätia jednej cievky):

$$U_{if1\max} = U_{ic1\max} \cdot 60 \cdot k_{d1} = 102,12 \cdot 60 \cdot 0,955 = 5857,47 \text{ V}$$

a jeho efektívna hodnota:

$$U_{if1} = 5857,47 / \sqrt{2} = 4149,5 \text{ V}$$

$$U_{if3\max} = U_{ic3\max} \cdot 60 \cdot k_{d3} = -22,39 \cdot 60 \cdot 0,643 = -863,80 \text{ V}$$

$$U_{if3} = -863,80 / \sqrt{2} = -612,6 \text{ V}$$

$$U_{if5\max} = U_{ic5\max} \cdot 60 \cdot k_{d5} = 5,47 \cdot 60 \cdot 0,197 = 64,65 \text{ V}$$

$$U_{if5} = 64,65 / \sqrt{2} = 45,85 \text{ V}$$

Výraz pre okamžitú hodnotu fázového napätia je takýto:

$$u_{if} = U_{if1\max} \sin \omega t + U_{if3\max} \sin 3\omega t + U_{if5\max} \sin 5\omega t = \\ = 5851,47 \sin \omega t - 863,8 \sin 3\omega t + 64,65 \sin 5\omega t$$

Efektívna hodnota výsledného fázového napätia bude:

$$U_{if} = \sqrt{U_{if1}^2 + U_{if3}^2 + U_{if5}^2} = \sqrt{4149,5^2 + 612,6^2 + 45,8^2} = 4215 \text{ V}$$

a združené napätie

$$U_i = \sqrt{3} \cdot \sqrt{4149,8^2 + 45,8^2} = 7213 \text{ V,}$$

pretože 3. harmonická sa v združenom napätí neobjaví.

Efektívne hodnoty jednotlivých harmonických môžeme vypočítať aj podľa klasického vzťahu pre fázové napätie.

Základná harmonická:

$$U_{if1} = \sqrt{2}\pi \cdot f_1 \Phi_{1\text{str}} N k_{v1} = \sqrt{2}\pi \cdot 50 \cdot 0,1122 \cdot 180 \cdot 0,9225 = 4136 \text{ V}$$

kde N je počet závitov jednej fázy a koeficient vinutia k_{v1} vypočítame nasledovne:

$$k_{v1} = k_{d1} k_{p1} = 0,955 \cdot 0,966 = 0,9225$$

Výpočet pre harmonické zložky urobíme na základe pomeru so základnou harmonickou (pozri kap. 3.2.7):

$$U_{iv} = U_{i1} \frac{B_{\delta\max v}}{B_{\delta\max 1}} \frac{k_{v v}}{k_{v 1}}$$

Hodnoty koeficientov vinutí harmonických zložiek:

$$k_{v3} = k_{d3} k_{p3} = 0,643 \cdot 0,707 = 0,4546$$

$$k_{v5} = k_{d5} k_{p5} = 0,197 \cdot 0,259 = 0,051$$

$$U_{if3} = U_{if1} \frac{B_{\delta\max 3}}{B_{\delta\max 1}} \frac{k_{v3}}{k_{v1}} = 4136 \frac{0,3}{1,0} \frac{0,4546}{0,9225} = 611,45 \text{ V}$$

$$U_{if5} = U_{if1} \frac{B_{\delta\max 5}}{B_{\delta\max 1}} \frac{k_{v5}}{k_{v1}} = 4136 \frac{0,2}{1,0} \frac{0,051}{0,9225} = 45,73 \text{ V}$$

Celková efektívna hodnota indukovaného napätia jednej fázy bude

$$U_{if} = \sqrt{4136^2 + 611,45^2 + 45,73^2} = 4182 \text{ V}$$

Rozdiel v hodnotách indukovaného napätia je spôsobený častými matematickými operáciami s číslami s neukončeným rozvojom ($\sqrt{2}$, π atď.).

Príklad 3.2.10

Trojfázový, do hviezdy zapojený, 50 Hz, 6-pólový synchronný generátor má strednú hodnotu základnej harmonickej magnetického toku na pól 0,015 Wb. Stator má 90 drážok, 4 vodiče v drážke a každá statorová cievka obopína 12 drážok. Ak magnetický tok vo vzduchovej medzere obsahuje 30 % tretej a 20 % piatej harmonickej vo vzťahu k základnej, vypočítajte efektívne hodnoty fázového a združeného indukovaného napätia.

Riešenie:

Počet drážok na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{90}{6} = 15$$

Krok cievky $Y = 12$.

Počet drážok na pól a fázu

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{90}{6 \cdot 3} = 5$$

Počet závitov jednej fázy určíme z počtu vodičov v drážke

$$\frac{N}{pq} = 4 \Rightarrow N = 4pq = 4 \cdot 3 \cdot 5 = 60 \text{ závitov}$$

Koeficient rozloženia vinutia, kroku a vinutia pre jednotlivé harmonické (pozri predchádzajúce príklady)

$k_{d1} = 0,956$	$k_{p1} = 0,95$	$k_{v1} = 0,908$
$k_{d3} = 0,645$	$k_{p3} = 0,588$	$k_{v3} = 0,379$
$k_{d5} = 0,2$	$k_{p5} = 0$	$k_{v5} = 0$

Efektívna hodnota indukovaného napätia jednotlivých harmonických

$$U_{ifv} = \sqrt{2}\pi f_v \Phi_{vstr} N k_{v v}$$

$$U_{if1} = \sqrt{2}\pi \cdot 50 \cdot 0,015 \cdot 60 \cdot 0,908 = 181,418 \text{ V}$$

$$U_{if3} = \sqrt{2}\pi \cdot 3 \cdot 50 \cdot 0,3 \cdot 0,015 \cdot 60 \cdot 0,379 = 68,15 \text{ V}$$

$$U_{if5} = \sqrt{2}\pi \cdot 5 \cdot 50 \cdot 0,2 \cdot 0,015 \cdot 60 \cdot 0,00 = 0 \text{ V.}$$

Efektívna hodnota celkového napätia jednej fázy

$$U_{if} = \sqrt{U_{if1}^2 + U_{if3}^2 + U_{if5}^2} = \sqrt{181,418^2 + 68,15^2 + 0} = 193,79 \text{ V}$$

V združenom napätí sa neobjaví ani tretia harmonická, preto združené napätie sa vypočíta len z U_{if1} :

$$U_i = \sqrt{3}U_{if1} = 314,25 \text{ V}$$

Príklad 3.2.11

Trojfázový, 50 Hz, 1000 min⁻¹ synchronný generátor má 72 drážok, štyri vodiče v drážke, rozpätie cievky je 120° el. (uhol kroku). Magnetický tok vo vzduchovej medzere obsahuje okrem 1. harmonickej $\Phi_1=0,06\text{Wb}$ aj 10 % tretej a 5 % piatej harmonickej.

Vypočítajte efektívnu hodnotu indukovaného napätia jednotlivých harmonických a napíšte vzťah pre okamžitú hodnotu indukovaného napätia.

Riešenie:

Počet pólových dvojíc

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3, \quad \text{t.j. } 2p = 6$$

Z počtu vodičov v drážke určíme počet závitov jednej fázy

$$N = 4pq = 4 \cdot 3 \cdot 4 = 48 \text{ závitov}$$

kde počet drážok na pól a fázu

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{72}{6 \cdot 3} = 4.$$

$$\alpha_d = \frac{p360}{Q} = \frac{3 \cdot 360}{72} = 15^\circ$$

Počet drážok na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{72}{6} = 12 \approx 180^\circ \text{ el.}$$

$$Y = 120^\circ, \text{ resp. } \frac{Y}{Q_p} = \frac{120^\circ \text{ el.}}{180^\circ \text{ el.}}$$

$$Y = \frac{120^\circ}{180^\circ} \cdot 12 = 8 \text{ drážok}$$

Koeficienty rozloženia vinutia, kroku a vinutia pre jednotlivé harmonické (pozri predchádzajúce príklady)

$k_{d1} = 0,958$	$k_{p1} = 0,866$	$k_{v1} = 0,829$
$k_{d3} = 0,653$	$k_{p3} = 0$	$k_{v3} = 0$
$k_{d5} = 0,2055$	$k_{p5} = -0,866$	$k_{v5} = -0,1779$

Efektívne hodnoty napätí jednotlivých harmonických

$$U_{i1} = \sqrt{2} \pi f_1 \Phi_{1\text{str}} N k_{v1} = \sqrt{2} \pi \cdot 50 \cdot 0,06 \cdot 48 \cdot 0,829 = 530 \text{ V}$$

$$U_{i1\text{max}} = \sqrt{2} \cdot 530 = 749,53 \text{ V}$$

$$U_{i3} = 0$$

$$U_{i5} = \sqrt{2} \pi \cdot 5 \cdot 50 \cdot 0,05 \cdot 0,06 \cdot 48 \cdot (-0,1779) = 28,43 \text{ V}$$

$$U_{i5\text{max}} = \sqrt{2} U_{i5} = 40,2 \text{ V}$$

Vzťah pre okamžitú hodnotu napätia napíšeme takto:

$$u_i = U_{i1\text{max}} \sin \omega t + U_{i5\text{max}} \sin 5\omega t + \dots = 749,53 \sin \omega t - 40,2 \sin 5\omega t + \dots$$

Príklad 3.2.12

2-pólový, 3-fázový, do hviezdy zapojený, 60 Hz synchronný generátor s hladkým, resp. valcovým rotorom má budiace vinutie na rotore s $N_b = 46$ závitmi, koeficientom budiaceho vinutia $k_{vb} = 0,9$ a budiacim jednosmerným prúdom $I_b = 1500$ A. Na statore je kotva s $N_a = 24$ závitmi na fázu, s koeficientom vinutia $k_{va} = 0,833$, priemerom kotvy $d = 1$ m a efektívnou dĺžkou železa $l_{Fe} = 4$ m. Vzduchová medzera $\delta = 75$ mm.

Vypočítajte:

- Aké otáčky musí mať pohonný motor, aby synchronný generátor vyrobil napätie s príslušnou frekvenciou?
- Amplitúdu 1. harmonickej magnetického napätia vytváranú budiacim vinutím.
- Amplitúdu 1. harmonickej magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere.
- Magnetický tok 1. harmonickej vo vzduchovej medzere.
- Efektívnu hodnotu indukovaného napätia kotvy (fázového a združeného).
- Amplitúdu 1. harmonickej magnetického napätia kotvy, ak prúd $I_a = 200$ A.

Riešenie:

$$\text{a) } n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{1} = 3600 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{b) } U_{\text{magb1max}} = \frac{4 N_b}{\pi 2p} k_{vb} I_b = \frac{4 \cdot 46}{\pi \cdot 2} 0,9 \cdot 1500 = 39534 \text{ A/pól}$$

$$\text{c) } U_{\text{magb1max}} = H_{1\text{max}} \delta = \frac{B_{\delta 1\text{max}}}{\mu_0} \delta \Rightarrow$$

$$B_{\delta 1\text{max}} = \frac{\mu_0 U_{\text{magb1max}}}{\delta} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 39534}{75 \cdot 10^{-3}} = 0,661 \text{ T}$$

$$\text{d) } \Phi_{\text{str1}} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1\text{max}} \frac{\pi d}{2p} l_{Fe} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,661 \cdot \frac{\pi \cdot 1}{2} \cdot 4 = 2,64 \text{ Wb}$$

$$\text{e) } U_{\text{if}} = \sqrt{2} \pi f \Phi_{\text{str}} N_a k_{va} = \sqrt{2} \pi \cdot 60 \cdot 2,64 \cdot 24 \cdot 0,833 = 14,1 \text{ kV}$$

$$U_i = \sqrt{3} \cdot 14,1 = 24,4 \text{ kV}$$

$$\text{f) } U_{\text{maga1}} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \frac{N_a I_a k_{va}}{p} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \frac{24 \cdot 200 \cdot 0,833}{1} = 5399 \text{ A}$$

NERIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 3.2.13

Aký magnetický tok Φ musí mať stroj, ktorého indukované napätie je 220 V. Jeho trojfázové vinutie má neskrátený krok a $q = 1$. Celkový počet závitov $N = 10$.

($\Phi = 0,1$ Wb)

Príklad 3.2.14

Aký bude činiteľ vinutia z príkladu 3.2.13 pre 5. harmonickú pri skrátení kroku o 1/6

t. j. na krok $Y = \frac{5}{6} \tau_p$?

($k_{v5} = 0,26$)

Príklad 3.2.15

Akou rýchlosťou sa bude otáčať magnetické pole trojfázového vinutia s $N = 115$, $p = 2$, pri napájaní trojfázovým prúdom s frekvenciou $f = 40$ Hz?

($n = 1200 \text{ min}^{-1}$)

Príklad 3.2.16

Vypočítajte činiteľ rozloženia vinutia pre 1., 5., 11. a 17. harmonickú trojfázového vinutia s 24 pólmi, ktoré je uložené v 216 drážkach.

($k_{d1} = 0,96$; $k_{d5} = 0,217$; $k_{d11} = -0,177$; $k_{d17} = 0,96$)

Príklad 3.2.17

Stator trojfázového štvorpólového stroja má priemer vŕtania statora 15 cm, efektívnu dĺžku železa 12 cm a 36 drážok. V drážkach je uložené dvojvrstvé vinutie s drážkovým krokom 7. Pre fázové napätie 220 V je maximálna hodnota sínusového priebehu magnetickej indukcie 0,62 T. Vypočítajte počet vodičov v jednej drážke za predpokladu, že úbytok napätia na rozptylovej reaktancii vinutia je zanedbateľný.

($N = 32,8$ vodičov)

Príklad 3.2.18

Vypočítajte indukované napätie osempólového trojfázového stroja, ktorý má 48 drážok a 20 vodičov v drážke. Vinutie má skráteneý krok na $5/6\tau_p$, priebeh magnetickej indukcie je sínusový s amplitúdou 0,62 T. Vnútorňý priemer statora je 78 cm a aktívna dĺžka železa 51 cm.

($U_{if} = 2043$ V)

Príklad 3.2.19

Vypočítajte amplitúdu pulzujúceho (jednofázového) a točivého (trojfázového) magnetického napätia pre 1. a 17. harmonickú trojfázového dvanásťpólového vinutia s plným krokom, uloženého v 108 drážkach, ak v každej drážke je 6 vodičov pretekaných efektívnym prúdom 135 A.

($U_{\text{mag}1,1} = 2099,1 \text{ A}$; $U_{\text{mag}1,3} = 3148,6 \text{ A}$; $U_{\text{mag}17,1} = 123,5 \text{ A}$; $U_{\text{mag}17,3} = 185,2 \text{ A}$)

Príklad 3.2.20

Trojfázový, do hviezdy zapojený, 60 Hz, 6-pólový synchronný generátor má prvú harmonickú magnetického toku na pól 0,02 Wb. Stator má 90 drážok, 4 vodiče v drážke a každá statorová cievka obopína 12 drážok. Ak stredná hodnota magnetického toku vo vzduchovej medzere obsahuje 30 % tretej a 20 % piatej harmonickej vo vzťahu k prvej, vypočítajte efektívne hodnoty fázového a združeného indukovaného napätia.

($U_{\text{if}} = 310 \text{ V}$; $U_i = 502,8 \text{ V}$)