
UNIVERZITA OBRANY

Fakulta vojenských technologií

Katedra elektrotechniky

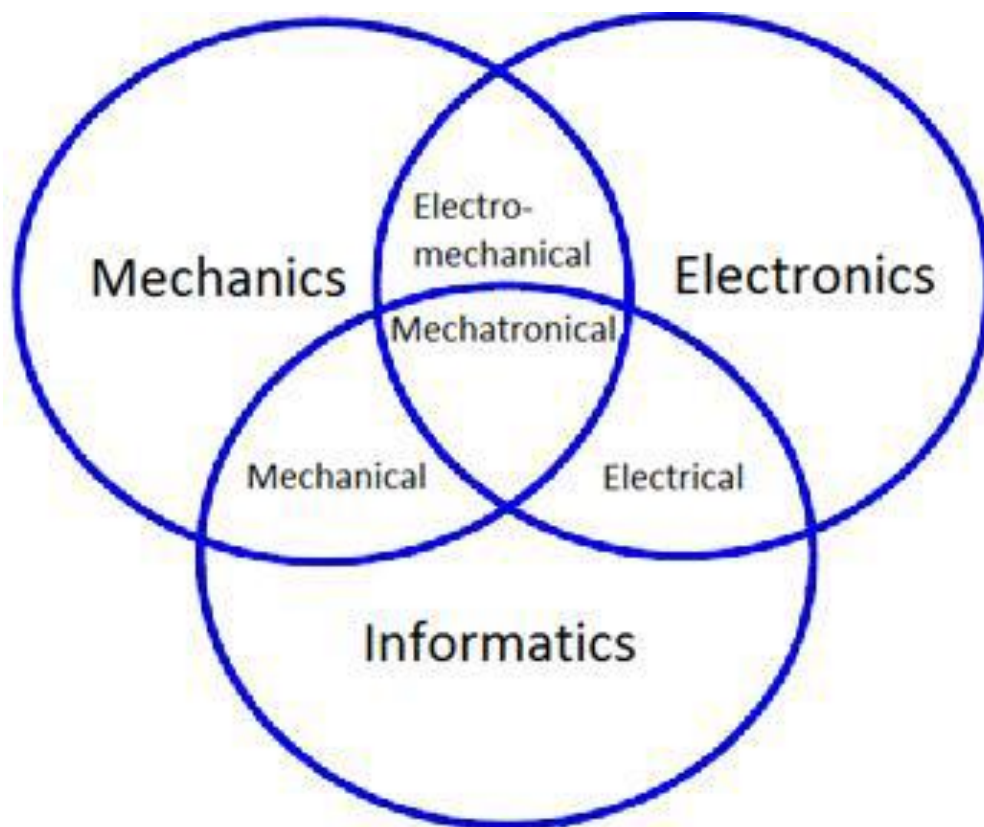
BETA verze

Výkonová elektrotechnika (pro část předmětu ZEVE 2)

Autor:

doc. Ing. Vít BRŠLICA, CSc.

Brno 2016



Ján VLNKA: Definice mechatroniky,

*In: Problems in the teaching of electrical engineering at the Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology,
14th International Symposium Mems 2016 Mechatronika 2016 Faculty Of Mechanical Engineering Slovak University Of Technology, Bratislava, SLOVAKIA, May 25-27. 2016
ISBN 978-80-227-4564-2*

ISBN 978-80-xxx

PŘEDMLUVA

Studijní text je určen pro posluchače 1. ročníku studijního programu SP 2014 pro samostatné studium předmětu ZEVE2 – část Výkonová Elektrotechnika, která má celkem rozsah 22 hodin v členění **12 hodin přednášek** 8 hodin laboratoří a 2 h numerických cvičení. Obsahově se bezprostředně navazuje na Základy Elektrotechniky v 1. Semestru (24 h + 12h + 12h) a Základy Elektrotechniky ve druhém semestru (12h + 10h + 4h) přednášek cvičení a laboratoří.

Studijní text kopíruje rozložení výuky do 6 přednášek, kam se musí vejít celá výkonová (silnoprúd = POWER...) elektrotechnika omezena zde jen na základy elektromechaniky, tedy na oblast elektrických strojů. Obsahuje následující kapitoly:

1. Základy energetiky a trojfázové obvody
2. Magnetická energie a elektromagnety, úvod do elektrických strojů
3. Transformátory
4. DC stroje
5. Synchronní generátor a točivé pole
6. Asynchronní motor indukční

Oproti dosud používaným skriptům **S-2593/I (242 str., 200 obr.)**, která byla koncipována pro předmět v rozsahu **30h + 15h + 15h** je obsah zredukován na cca čtvrtinu, při čemž je největší problém co zachovat a jak podat, aby obsah tvořil logicky návazný celek, navíc se musela doplnit část o trojfázových obvodech, na které v části ZE nezbylo místo, ale pro výkonovou elektrotechniku jsou nezbytné.

Významnou součástí studia předmětu jsou praktická zaměstnání v laboratoři, v nichž studenti získávají nejen základní poznatky z praktických měření elektrických a mechanických veličin, ale mohou se na vzorcích seznámit také s reálným provedením strojů. K přípravě na praktická zaměstnání jsou zpracovány nové návody, dostupné na webových stránkách katedry. Nová koncepce předpokládá velký podíl domácí práce studenta, která je ale v prvním ročníku málo efektivní. Snad vám tento text pomůže v této práci, každopádně nejdůležitější je nepromarnit čas na přednáškách, kde lze snadněji pochopit problematiku, protože se vždy ukáže i postup, který se v textu hledá jen těžko.

Samozřejmě lze nalézt mnoho dalších materiálů z různých středních i vysokých škol na internetu – jsou to jak prezentace, tak videa, poslední rada ke studiu technických předmětů zní: dokud si to sami nenakreslíte a nerozdělíte na jednotlivé logické kroky, tak to neumíte, tj. můžete maximálně tvrdit, že už jste to viděli, ale to je k pochopení a znalosti ještě hodně daleko!

Vít BRŠLICA

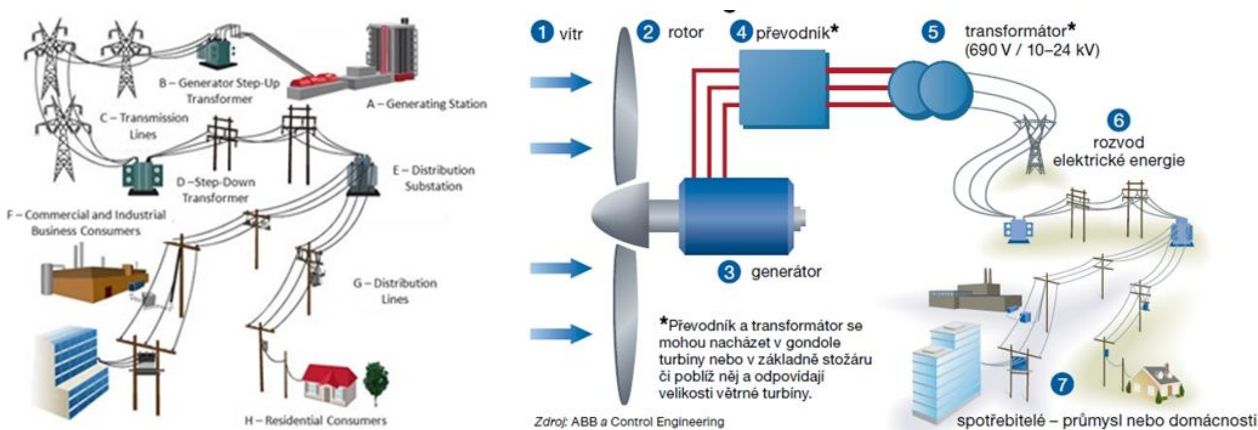
Úvod do Výkonové Elektrotechniky

Za posledních 100 let se Elektrotechnika z dělení na Silnoproud a Slaboproud postupně rozdělila na mnoho nových samostatných vědeckých oborů, to co dnes patří do oblasti Silnoproud (**POWER**) a s čím bychom se měli seznámit za půl semestru lze zařadit do těchto VĚDNÍCH OBORŮ:

- ELEKTROENERGETIKA výroba, přenos, rozvod EE
 - ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE pojistky, stykače, vypínače ...
 - ELEKTRICKÉ STROJE motory, generátory, transformátory
 - ELEKTRICKÉ POHONY řízení rychlosti, momentu a polohy
 - VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA polovodičové měniče a usměrňovače
- ... a další MEZIOBORY.

My zde stihneme probrat základy ELEKTROMECHANIKY, které budou později podkladem pro MECHATRONIKU a další odborné předměty. Vůbec zde nebude čas ani na jedno zaměstnání z **Výkonové elektroniky**, váha předmětu bude soustředěna do základních elektrických strojů, kde rovněž probereme jen nejzákladnější principy bez přechodných dějů a nelinearit. Rovněž se nedostaneme k moderním strojům s permanentními magnety, nebo ke strojům reluktančním, které se rozvíjejí až s moderní měničovou technikou.

Protože předbíháme předměty teoretického základu, mnohdy se budu odvolávat na jednodušší formulace vědeckých poznatků, jak je znáte ještě ze základní a střední školy bez použití diferenciálního a integrálního počtu, tam kde bude jen trochu možné.



Výroba, přenos a distribuce EE

1. Základy energetiky a trojfázové obvody

Zopakujme si základní rozdíl mezi energií (prací) a výkonem, z fyziky známe, že **energie** je součin **síly** a **dráhy**, takže jednotka **Joule** je

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m}$$

Jeden Joule je hodně malá jednotka, doma kupujeme elektrickou energii (dále EE) na **kilowatthodiny**, zkusme převést na základní jednotky

$$1\text{ kWh} = 3600\text{ kWs} = 3,6\text{ MJ (!)}$$

Jeden litr benzínu má energetický obsah 33MJ, to je jeho spálením dostaneme cca 9kWh, pokud v motoru získáváme energii mechanickou s účinností 40%, tak na hřídeli už bude jen 3,5kWh.

Výkon je množství práce za čas, jednotkou je Watt

$$1\text{W} = 1\text{J} / 1\text{s}$$

Tedy $1\text{ J} = 1\text{Ws}$.

Do 18 století lidstvo s malými výjimkami používalo jako zdroj mechanické energie jen sílu z lidských a zvířecích svalů, výjimky byly vodní či větrné mlýny a plachetnice. Více než 80% populace proto muselo pracovat v zemědělství, aby uživilo sebe a tažná zvířata. Tepelnou energii na přípravu pokrmů lidé získávali z obnovitelných zdrojů energie rostlinného původu. Obory lidské činnosti tehdy byly:

- Zemědělství
- Stavitelství
- Doprava
- Mlýny
- Dobývání nerostů
- Lov a boj

Teplo a světlo (mimo slunečního záření) lidé získávali z ohně. Až parní stroj přinesl „energetické otroky“, kteří nepotřebovali potravu, ale jiný zdroj tepelné energie. Napřed se spálily lesy v Anglii, pak se přišlo na to, že i černé (a hnědé) hořlavé kameny jsou dobré a začala éra spotřeby fosilních zdrojů. Po éře uhlí přišla ropa, pak zemní plyn a po 2. světové válce i jaderná energie. O krátkém horizontu vyčerpání neobnovitelných zdrojů se píše už půl století a stále více se tlačí na obnovitelné zdroje = vítr, voda, sluneční světlo, biomasa, které mají přinést zásadní převrat v energetice.

Zde bychom mohli připomenout, jaké energie známe a že ve fyzice platí zákon zachování energie.

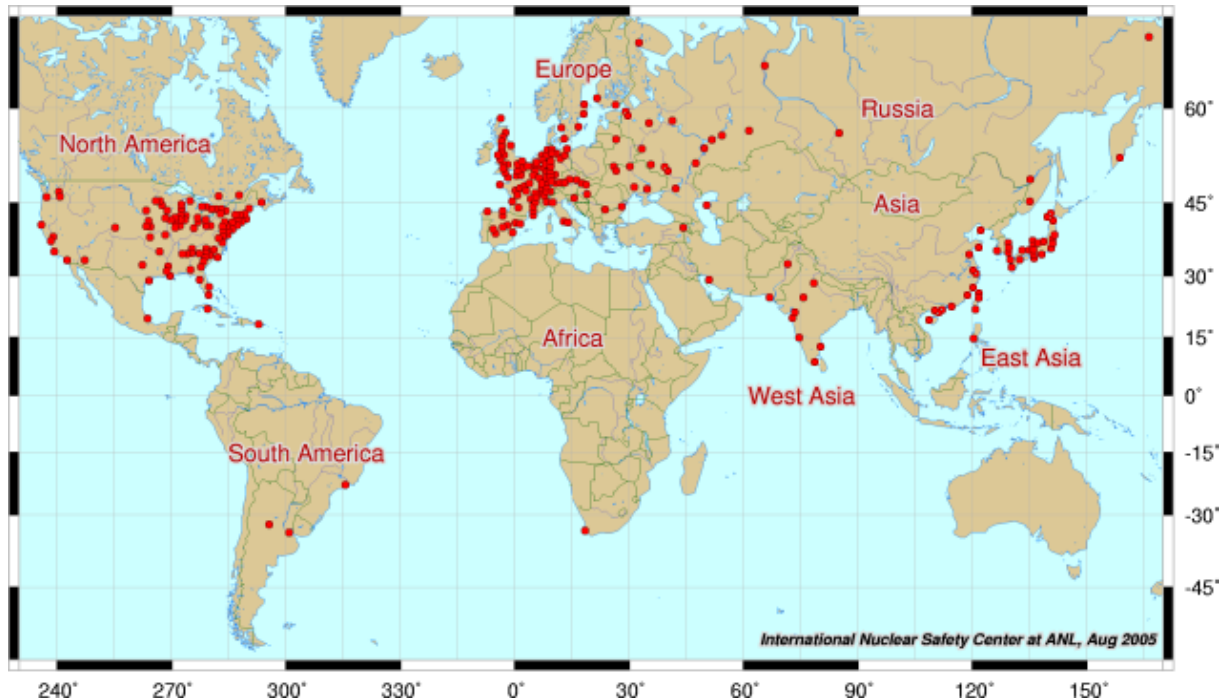
- Mechanická
- Elektrická
- Tepelná
- Světelná
- Chemická
- Jaderná

Známe techniku přímé přeměny každé energie na EE a naopak, ale ne každá z těchto přeměn je dostatečně efektivní a ekonomická.

V reálném světě při každé proměně energií hovoříme o **účinnosti**, tedy „ztrátě energie“ při každé přeměně, a to co chybí (do 100%) je nízko-potenciálové teplo, které musíme komplikovaně odvádět, aby nepoškodilo zařízení. Toto je problém zejména u zařízení větších výkonů.

Parní stroj byl prvním zdrojem mechanické energie, která se složitě a nebezpečně rozváděla po dílnách systémem transmisí a řemenů = třecí převod s dobrou účinností. Komfortní, ale opět ztrátový

systém přenosu mechanické energie je pneumatický, nebo hydraulický systém, který je ale použitelný jen na krátké vzdálenosti několika metrů od zdroje energie. EE umožňuje přenos na dlouhé vzdálenosti s malými ztrátami. Podívejme se do krátké historie EE.



Jaderné elektrárny JE ve světě

Prvním zdrojem elektrického proudu byl až elektrochemický Voltův článek, baterie (sloupec) těchto článků umožňovala napájet malý motor, když se objevily zákony elektrodynamiky. Edisonovo dynamo pak umožnilo elektrifikaci, ale s problémem malého dosahu sítí nízkého napětí NN, to znamená, že by elektrárna musela být prakticky u každého obytného bloku. Tvorbu rozlehlých sítí umožnil až střídavý systém Teslův, kde lze napětí transformovat nahoru a tím snížit proud pro přenos velkých výkonů, také úbytky napětí na dlouhých vedeních i v řádech stovek voltů nepředstavují při kilovoltech žádné velké snížení účinnosti. Elektrárny mohou být daleko od obydlí a spoluprací mnoha zdrojů přes několik časových pásem lze lépe řešit problémy kolísání zátěže, dané rytmem života. EE se nedá ekonomicky skladovat, zato její doprava je velmi jednoduchá, pohodlná a levná. Podobá se na systém silniční dopravy se třemi typy komunikací:

- Přenosová síť VVN 3 x 400kV, 220kV 110kV
- Rozvodná síť VN 3 x 22kV 10kV 35kV (6kV)
- Distribuční síť NN 3 x 400/230V

Jak vidíte, zásadně se pracuje s trojfázovými sítěmi, které si později více přiblížíme, ještě jsme nezmínili, že celá Evropa používá frekvenci $f = 50\text{Hz}$, Amerika 60Hz . Na letadlech z důvodů hmotnosti strojů (generátory, motory, transformátory) se používá frekvence 400Hz , německé (DB) a rakouské (OBB) dráhy používají $16\frac{2}{3}\text{Hz}$ z vlastních elektráren z historických důvodů.

Náklady na přenos EE

Na dopravu EE nepotřebujeme žádnou jinou energii, ale část přepravované EE se ztrácí na vedeních, v transformátorech a ve spínacích stanicích. Ztracená energie se mění na teplo ve formě Jouleových ztrát, na každém odporu vznikají ztráty

$$\Delta P = R I^2$$

Ztráty EE vyjadřujeme ve Wattech, další pojem je **úbytek napětí**, který nesmí překročit jisté meze, aby zákazník dostal EE s předepsanými (nebo dohodnutými) parametry – tj. kvalitou EE. Ve

stejnoseměrných (DC) rozvodech je úbytek jen na odporech, ve střídavých (AC sítích) na impedanci, která má i jalovou složku. Pro vzdušná vedení zde převažuje indukčnost, protože kolem každého vodiče se vytváří magnetické pole, u kabelových vedení jsou vodiče velmi blízko sebe a tak převažuje kapacita mezi nimi, zatímco jejich indukčnost je zanedbatelná. Paradoxně se u kabelových vedení může vyskytovat i záporný úbytek napětí při obvyklých fázových poměrech a pro kapacitní zátěže se tento jev může objevit i pro RL trasu. Zde je třeba při vyšetřování úbytků napětí (ve voltech!) vždy respektovat fázové poměry a problém řešit v komplexní rovině.

Získávání EE

I když v poslední době se úžasně rychle rozvíjí fotovoltaika, zatím je základem elektrárenství výroba v točivých generátorech, z mechanické energie. Jen málo zemí na planetě má přírodní podmínky k získávání mechanické energie z vody (Norsko, Kanada, Rakousko), kde je dostatek vodních toků s velkým spádem H a průtokem Q , a výkon P z potenciální energie vody je:

$$P = Q g \rho H \quad [W, \text{ m}^3/\text{s}, 9,81\text{m/s}^2, 1000\text{kg/m}^3, \text{m}]$$

Větrné elektrárny čerpají z kinetické energie větru o rychlosti v , kde účinnost větrných turbín $\eta = 30 - 50\%$ a pro vrtuli s průměrem D bude výkon:

$$P = (1/8) \eta \rho \pi D^2 v^3 \quad [W, -, 1,2\text{kg/m}^3, \text{m}, \text{m}^3]$$

V ostatních elektrárnách mechanickou energii získáváme z tepelné energie paliva, kterou vytvoříme vodní páru o vysoké teplotě a tlaku a tou parou poháníme parní turbíny spojené s generátory. Podle frekvence pak udržujeme rychlost turbín na 3000/min pro 50Hz. V posledních 20 letech jste mohli zaznamenat informace o kombinovaném paroplynovém cyklu, když se místo spalování ušlechtilého paliva v kotli použije zemní plyn napřed ve spalovací turbíně (jako pohánějí letadla) a pak až se z výfuku těchto spalovacích turbín ohřívá voda v kotli pro parní turbínu. Účinnost těchto elektráren je přes 50%, ale první blok vyžaduje strojařsky náročnou redukci rychlosti turbíny z několika desítek tisíc na 3000/min.

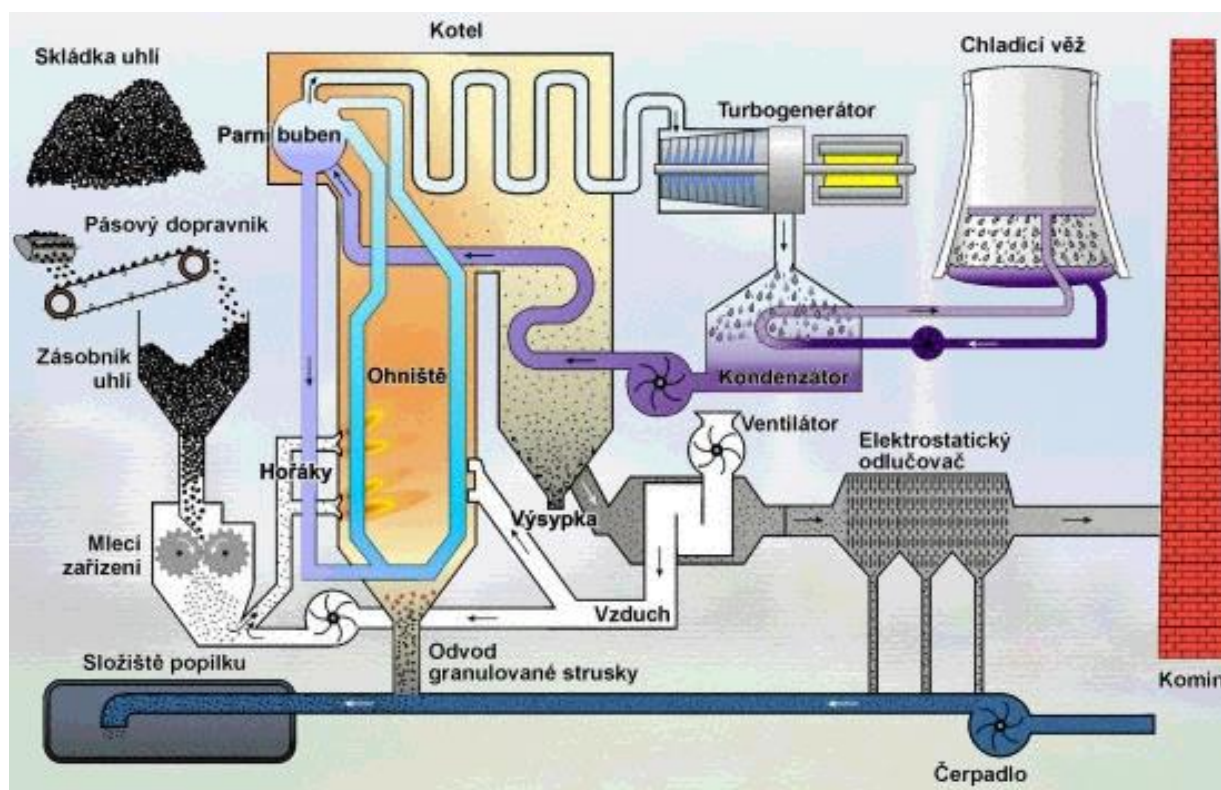


Schéma parní elektrárny

Palivo elektráren představuje výhodné úložiště energie, která se snadno ukládá i transportuje, chemická energie uhlovodíků je nejvyšší možná koncentrace hustoty energie (MJ/kg) pokud nebereme do úvahy hustotu energie v jaderném palivu.

Naopak vyrobená EE se musí hned spotřebovat, proto jsou výhodné co největší sítě, aby každá kilowatthodina hned někde našla svého spotřebitele. Ukládání EE ve formě složek elektromagnetického pole v cívce nebo kapacitoru umožní sice uložit velké výkony, ale jen krátkou dobu a tedy energie $\int P dt$ je malá!. Problém ukládání EE v bateriích nebo ve vodíku je spojen s přeměnou (konverzí) a tedy součinem dvou účinností pro zpětné získání EE. Má význam jen v případě okamžitého přebytku EE na trhu a tím nízké ceny této energie mimo odběrové špičky. Lepší je řízení spotřeby v současných programech SMART GRIDS (chytré sítě), nebo jak se řešilo již před více než půl stoletím akumulacím ohřevem s časovým nebo HDO ovládáním z dispečinku.

Trojfázové obvody

Jak se v praxi realizují trojfázové zdroje, si řekneme až v předposlední přednášce, zatím tedy jen tolik, že se jedná o tři identické zdroje střídavého napětí, jejichž časové průběhy jsou o 120° elektrických (!) posunuty, což lze vidět na osciloskopu jako 3 sinusovky. V komplexní rovině jsou fázory těchto zdrojů rovněž pootočený vzájemně o 120° a lze uvažovat dva různé způsoby spojení.

Začneme jednodušším do hvězdy neboli Y. Zde je společný jeden bod, který může nebo nemusí být vyveden a pak rozlišujeme sítě:

- Trojvodičové
- Čtyřvodičové

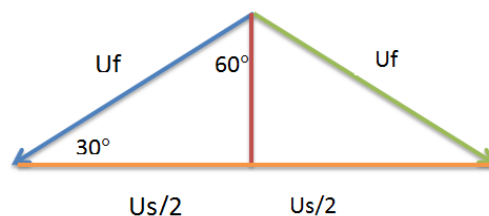
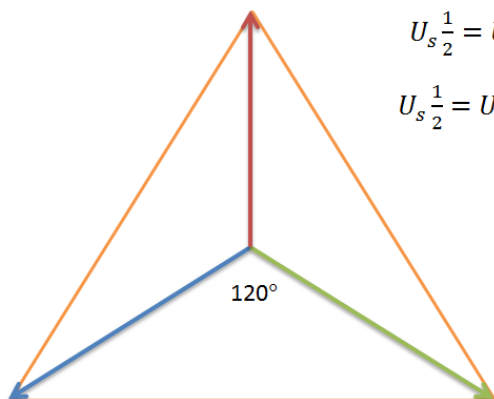
Napětí mezi fázovým a středovým vodičem nazýváme FÁZOVÉ, napětí mezi dvěma fázovými vodiči nazýváme SDRUŽENÉ a toto napětí se vždy uvádí u všech typů sítí (VN, NN, VVN). Vztah mezi nimi vyplývá z geometrie trojúhelníku fázových a sdrúženého napětí:

$$U_s = \sqrt{3} U_f$$

Napětí Fázové vs. Sdrúžené

$$U_s \frac{1}{2} = U_f \cos 30^\circ$$

$$U_s \frac{1}{2} = U_f \frac{\sqrt{3}}{2} \quad U_s = U_f \sqrt{3}$$



Historicky střední vodič použil už Edison v DC rozvodu a v USA je tak dodnes rozváděna EE v NN sítích $2 \times 110V$, kde se vůbec nepoužívá trojfázový systém, ale větší spotřebiče jsou na napětí 220V.

Výhodou středního vodiče je úspora materiálu, protože spojením dvou vodičů se celý jeden průřez ušetří, dále lepší účinnost přenosu, kdy při plném zatížení obou krajních vodičů je proud **středním**

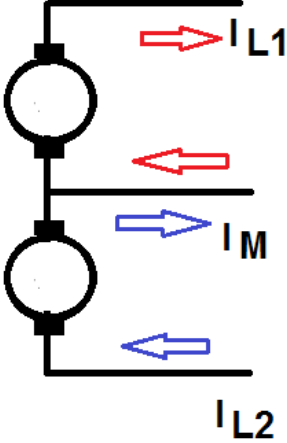
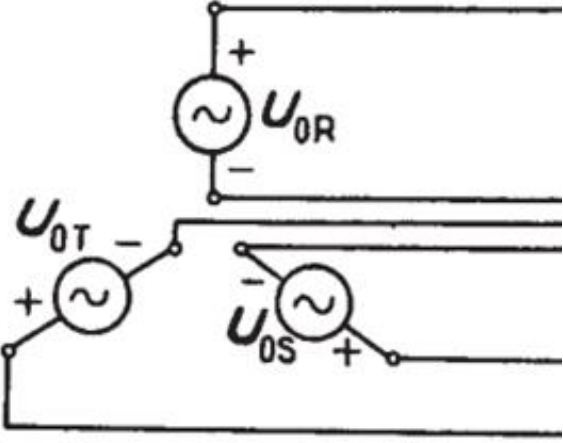
vodičem NULA a když v něm není proud, nejsou ztráty, a nebude ani úbytek na tomto vodiči, co zmenší pokles napětí na spotřebičích.

Čtyřvodičová síť

Tak jako jsou zdroje spojeny do Y tak předpokládejme i zátěž a její střed bude spojen se středem zdroje. Pak lze řešit samostatně tři smyčky, ve které je vždy jen jeden zdroj. Proud, který poteče středním vodičem (N) bude součtem proudů krajních (fázových) vodičů L1, L2, L3. Střídavé proudy je nutno sčítat geometricky s respektem k fázovému posunu, takže pokud je zátěž symetrická a tudíž jednotlivé zdroje dodávají proudy stejné velikosti a stejného fázového posunu (účinníky $\cos\varphi$ všech tří impedancí Z1 až Z3 jsou stejné), třeba 3 x 10A, tak součet není 30A ale 0A!

$$I_N = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}$$

V případě nesouměrné zátěže, třeba v bytě kde z jedné fáze odebíráte 2kW do varné konvice a z druhé jen 150W pro ledničku (zde každý odběr i s jiným účinníkem), tak stále **středním vodičem** teče menší proud, než vodiči fázovými a také 4-vodičové kabely mají střední vodič s menším průřezem.

Edison:	Tesla:
$I_M = I_{L1} + I_{L2} = 10 + (-10) = 0$	$I_N = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 10 + 10\angle 120^\circ + 10\angle 240^\circ = 0$
	

Třívodičová síť

Stále uvažujeme spojení zdrojů napětí i impedancí zátěže do Y. Pro zátěž také platí I.K.Z., a tedy musí platit rovnice

$$I_N = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 0$$

Pokud je zátěž souměrná, tak se napětí (potenciál) středu zátěže nastaví na stejnou hodnotu, jako je potenciál středu zdroje i když nejsou propojeny, jakmile ale bude symetrie zátěže porušena, tak se střed zátěže může volně posouvat mezi vrcholy trojúhelníku sdružených napětí. Uvedme si příklad krajní nesouměrnosti, kdy v jedné fázi zátěže vznikne zkrat, tj. $Z_1 = 0$, pak střed zátěže bude na potenciálu U_{L1} a na dalších dvou impedancích se objeví sdružené napětí, pokud by se jednalo o žárovky, tak při zkratování jedné by se ostatní dvě přepálily, jelikož by se na nich místo 230V objevilo napětí 400V na které nejsou stavěny.

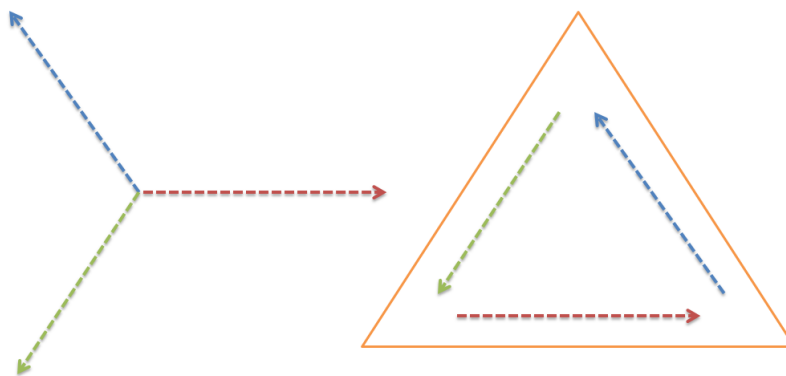
Zkuste sami odpovědět na otázku, jak by v tomto případě reagovala síť 4-vodičová.

Jako další otázku k zamyšlení a řešení si zapojte nesouměrnou zátěž – tři žárovky 230V různého výkonu, např. 40, 60 a 100W spojte do Y a připojte na síť 3 x 400V. Jaká budou fázová napětí na jednotlivých žárovkách, která shoří, a jaké pak bude napětí na ostatních dvou?

Ještě náročnější je situace, kdy nesymetrie není jen ve velikosti, ale i ve fázovém posunu jednotlivých impedancí, tam má vliv také pořadí, takže není jedno, jestli zapojíte R, L, C, nebo R, C, L.

Spojení do trojúhelníku Δ

Nejprve si všimněme, že spojením do Δ (pokud se tedy dodrží fázové posuny) se neudělá žádný zkrat, protože uzavřené smyčky tří zdrojů je součet napětí nulový, pokud respektujeme geometrii v komplexní rovině a pokud u některého ze zdrojů nepohodíme začátek a konec – v takovém případě bychom ovšem místo $400V + 400V + 400V$ nedostali $0V$ nýbrž $800V$ do zkratu! Když tedy dodržíme polaritu, dostaneme trojfázový zdroj a zde si všimneme, jak se na svorkách skládají proudy z jednotlivých vnitřních zdrojů. Pokud každý z těchto zdrojů dodává $10A$ tak svorkou poteče nikoliv $20A$, ale s respektem k fázovému posunu 120° to bude $\sqrt{3}$ krát více, prakticky tedy na ampérmetru $17,32A$, pokud je souměrná zátěž.



Skládání napětí a proudů v trojúhelníku

Pokud se pracuje s jednofázovými modely v náhradních schématech, je pro Δ nutná transfigurace, kterou jste v principu probrali v minulém semestru, zde jen upozorňuji na zachování výkonových poměrů před a po přepočtu, kdy se stejným poměrem sníží napětí a zvýší proud, takže impedance (i její složky) se musí snížit kvadrátem převodu, více k tématu bude ve třetí přednášce.

Ochrana před nebezpečným dotykem

Obecně jste se již v poučení o bezpečnosti setkali s tímto tématem, nyní trochu více. Téměř všechna zařízení jsou konstruována z vodivého kovu – oceli a tak při poruše izolace se na kovový kryt, s kterým může obsluha přijít do styku, dostane nebezpečné napětí (potenciál proti zemi, nebo jiným uzemněným konstrukcím, kudy se pak uzavře okruh přes tělo obsluhy a dojde k úrazu elektrickým proudem. U bezpečných napětí toto ohrožení není. Uzemněním kovového povrchu spotřebiče tedy zvyšujeme bezpečnost a chráníme zdraví obsluhy. Čím lepší vodivé pospojování všech kovových konstrukcí, tím menší bude odpor, na kterém při poruchovém proudu dojde k vytvoření úbytku napětí. Nulového odporu uzemnění nelze dosáhnout nikdy, v kamenitém a suchém podkladu je těžké splnit i hodnoty 2Ω . Podle způsobu uzemnění zdroje napětí a spotřebiče, které označujeme písmeny podle francouzský názvů:

T – terré (franc.) bezprostřední uzemnění určitého pracovního obvodu

I – isolé (franc.) insulated (angl.) izolace všech živých vodičů proti zemi nebo spojení bodu sítě se zemí přes velkou impedance

N – neutré (franc.) – neutral (angl.) – bezprostřední spojení všech neživých částí s uzemněným bodem ochranným vodičem

První písmeno je o spojení zdroje se zemí a Druhé písmeno o ochraně před nebezpečným dotykem.

Třetí písmeno:

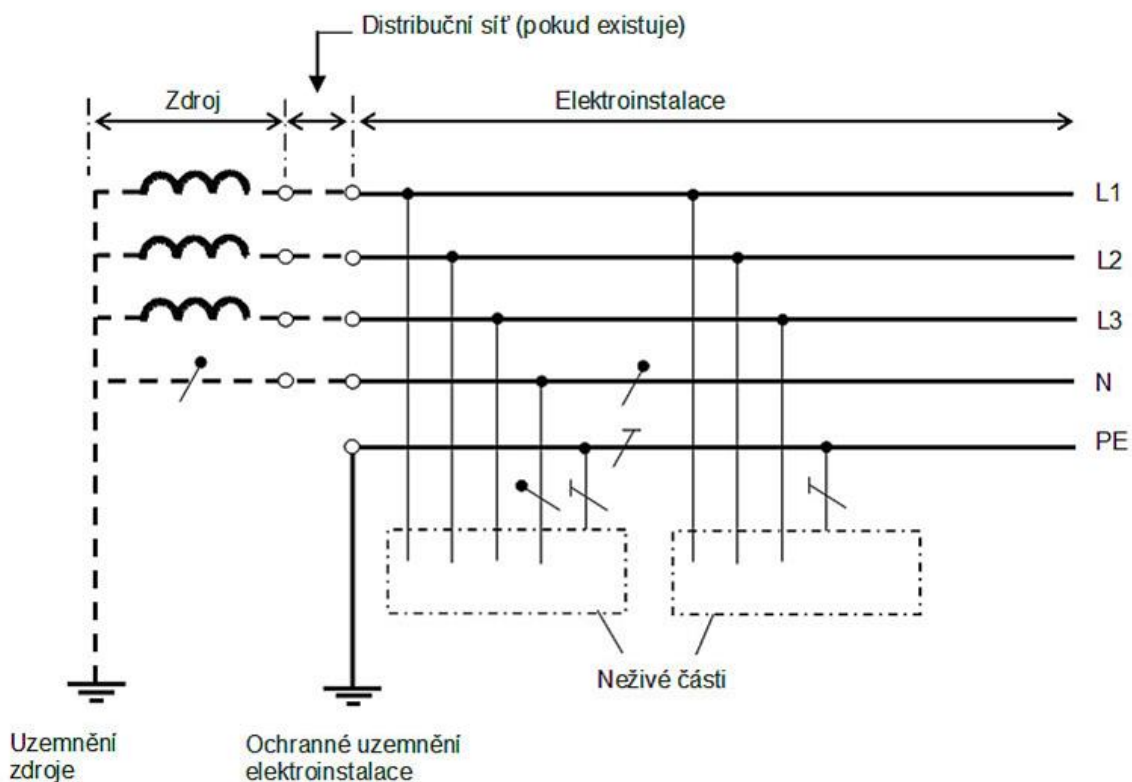
C – combiné (franc.) combined (angl.) – kombinace funkce středního vodiče N s ochranným PE

S – séparé (franc.) separated (angl.) – oddělení funkce středního vodiče N od ochranného PE

V kombinaci rozlišujeme tři základní typy sítí:

Sítě	popis:	Typicky:
TT	Střed zdroje je tvrdě, nebo přes tlumivku uzemněn	VVN
IT	Zdroj není spojen se zemí , často je ve spojení Δ a při náhodném doteku kteréhokoliv vodiče se zemí, proražení izolátoru, nebo spadení vodiče na zem, s jednou poruchou lze síť dočasně nouzově provozovat, než se zajistí „objížďka“ a oprava, nutný stálý MONITORING izolačního stavu!	VN síť +++ POJÍZDNÁ ZAŘÍZENÍ
TN–C TN–C–S TN–S	Střed zdroje uzemněn a veden jako střední vodič až na místo spotřeby, ke snížení vlivu odporu tohoto středního vodiče PEN na impedanci poruchové smyčky je vodič po celé trase rozvodu „přizemňován při každé možné příležitosti“ – minimálně co 500 metrů vzdušného vedení, u domovní skříňky, na konci vedení atp.	NN

Veřejné NN sítě jsou zásadně TN-C až do odběrného místa, tam se vodič PEN (žluto-zelený s modrou nálečkou) v rozvaděči rozdělí na střední N (bleděmodrý) a ochranný PE vodič (žluto-zelený), a **již nikde nesmí dojít k jejich spojení!** Další rozvod se stává 5 nebo 3 vodičový. Toto se vždy dodržovalo u pohyblivých přívodů a v poslední době povinně i při pevných domovních instalacích.

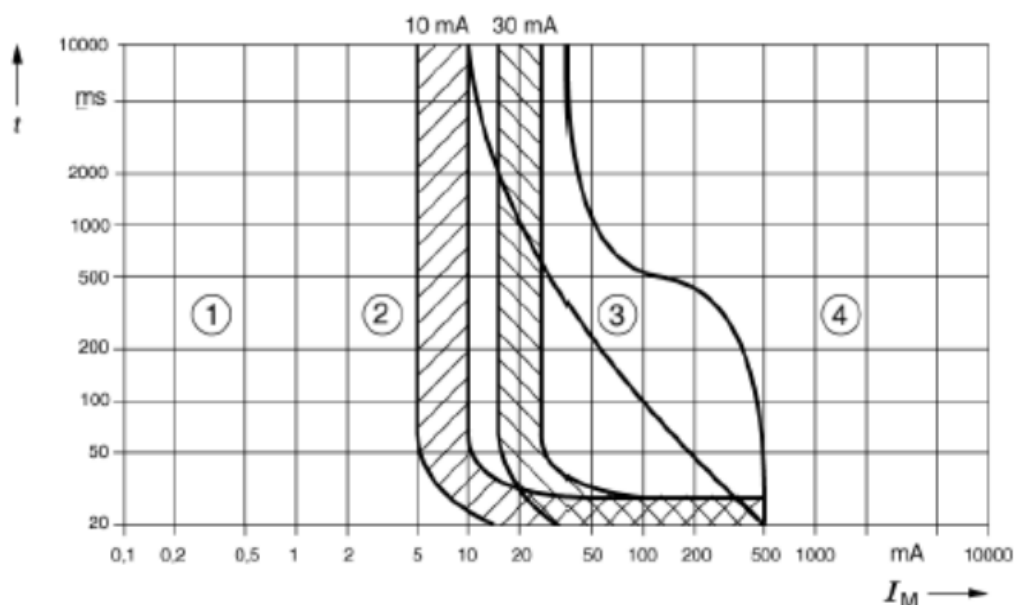


Sít TT se společným uzemněním

Samočinné odpojení

Když dojde k průrazu izolace na vodivý obal spotřebiče (dále kostru) tak, že se na ní objeví nebezpečné dotykové napětí (> 20V) měl by proud stoupnout takovou měrou, aby došlo

samočinnému odpojení přetavením pojistky, nebo jističem a to za dobu kratší než 20ms, aby nedošlo k srdeční zástavě. To ale vyžaduje, aby byl poruchový proud alespoň $I_k \geq 5 \cdot I_n$ a to pro větší nominální hodnoty pojistek vyžaduje dostatečně nízkou impedanci smyčky, která zahrnuje kromě vzdáleného zdroje, celý odpor vedení k místu poruchy a zemní odpory nebo celkový odpor ochranného vodiče PE.



Účinky elektrického proudu 50 Hz na člověka podle IEC 479:

Oblast 1 účinky nejsou obvykle patrné,

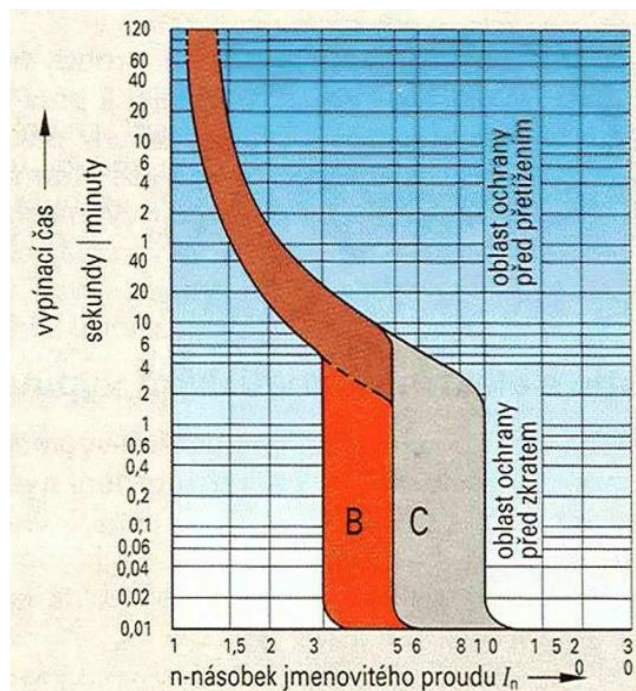
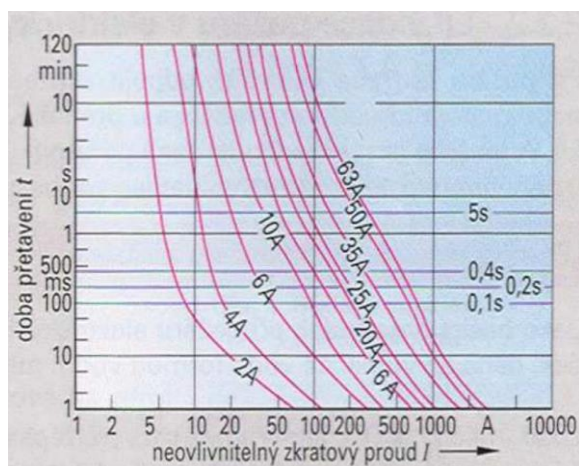
Oblast 2 obvykle ještě nedochází ke škodlivým fyziologickým účinkům,

Oblast 3 obvykle ještě nenastává nebezpečí fibrilace srdečních komor,

Oblast 4 může dojít k fibrilaci srdečních komor,

I_M : proud procházející lidským tělem, t : doba působení

Vypínací charakteristiky pojistek a jističů jsou pro ilustraci na následujícím obrázku.

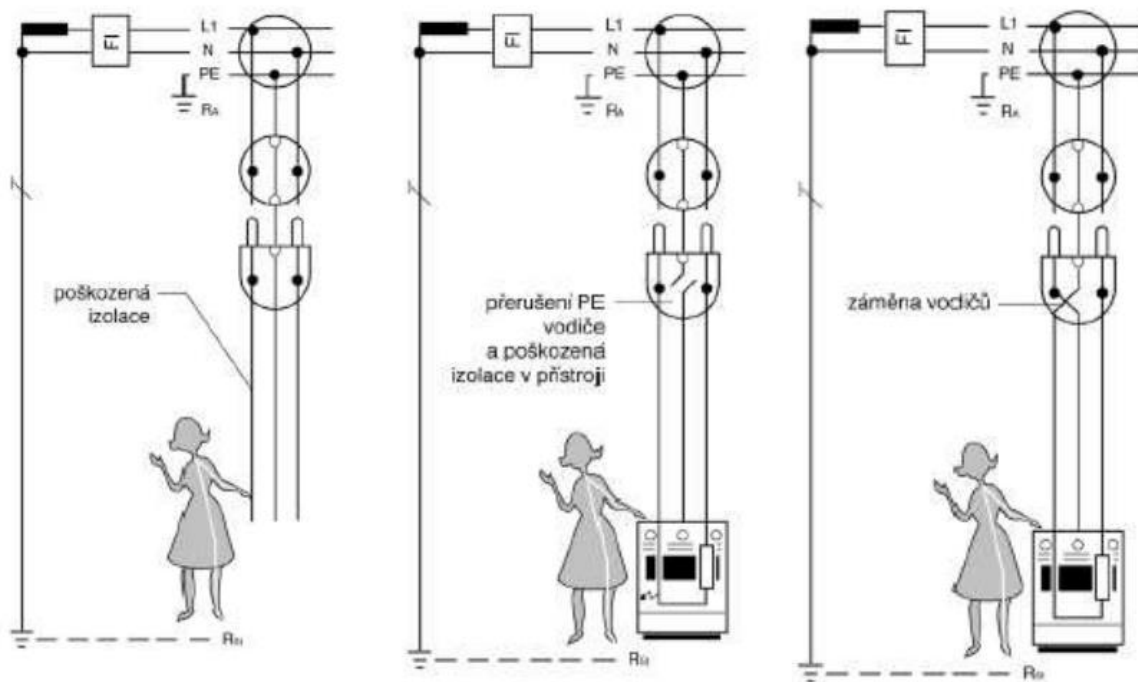


Vypínací charakteristiky tavných pojistek a jističů

Obecně čím větší poruchový proud, tím větší bude dotykové napětí na zemnicím odporu ($R_z = 5\Omega$) a tím kratší musí být doba odpojení.

Příklady náhodného přímého dotyku

Dojde-li k přímému dotyku živých částí, určují velikost protékajícího tělového proudu převážně dva odpory: vnitřní odpor lidského těla R_M a přechodový odpor stanoviště R_{St} . Pro předcházení nehod je třeba uvažovat nejnevýhodnější případ, tedy když se přechodový odpor stanoviště blíží nule. Odpor lidského těla závisí na dráze proudu. Měření prokázala např. při dráze proudu ruka/ruka nebo ruka/noha odpor asi 1000Ω . Při dotykovém napětí 230 V AC vzniká pro dráhu ruka/ruka proud 230 mA



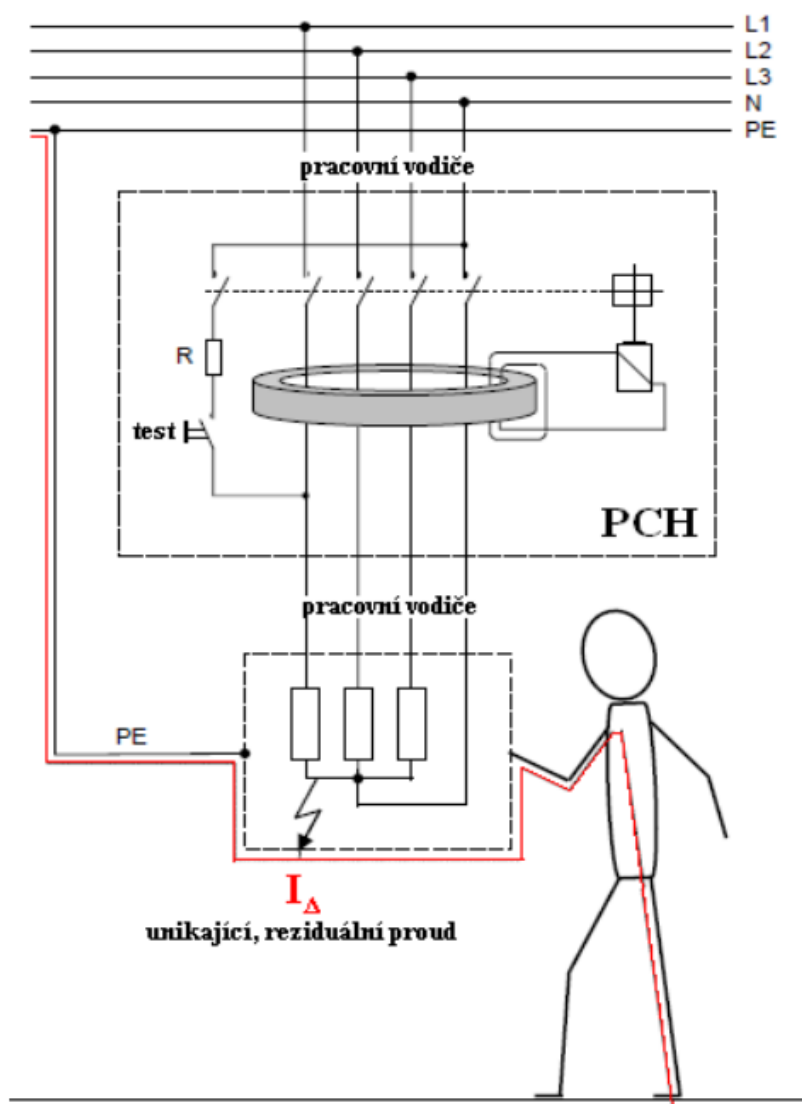
Příklady náhodného přímého dotyku kdy ochrání proudový chránič FI

PROUDOVÝ CHRÁNIČ

Tam kde je impedance smyčky příliš velká aby došlo při poruše k dostatečně velkému poruchovému proudu, který vypne v krátkém čase jistič prvek, doplňuje se instalace o přístroj, který reaguje na rozdíl v proudu do spotřebiče a zpět, to znamená, pokud je někde únik (i malinký) poruší se magnetická rovnováha v toroidu kolem všech napájecích vodičů a vyvolaný magnetický tok indukuje napětí do cívky elektromagnetu, který přeruší napájení spotřebiče s poruchou. Schéma takového proudového chrániče PCh je na Obr.

Proudový chránič je elektrický přístroj určený k ochraně před nebezpečným dotykovým napětím na neživé i živé části elektrických zařízení. Proudové chrániče se též využívají jako ochrana před vznikem požáru vinou porušené izolace kabelů. Proudový chránič je velice citlivý přístroj, porovnává velikost proudů v pracovních vodičích a v případě, že část proudu teče jinými, než pracovními vodiči vypíná obvod. Proudový chránič pracuje nezávisle na velikosti napětí.

Proudové chrániče s $I_{\Delta N} = 100$ a 300 mA se využívají k ochraně před vznikem požáru, umísťují se často do **elektroměrového rozvaděče** a chrání tak rozvod v celém objektu. Proudové chrániče s $I_{\Delta N} = 30$ mA (10 mA) se většinou využívají k ochraně zásuvkových obvodů a jsou většinou instalovány v **bytových rozvodnicích** apod.



Zapojení a princip proudového chrániče v síti TN-S

Dotykové napětí závisí na reziduálním proudu a odporu PE vodiče

UZEMNĚNÍ V SÍTI TN

- nulový bod, uzel - $R_A \leq 5$ (15) Ω , 20m pásku
- celkový odpor - $R_B \leq 2 \Omega$
- u venkovního rozvodu každých 500m,
- na konci venkovního vedení a odboček delších jak 200m
- kabelové vedení delších jak 200m od místa předchozího uzemnění a na konci
- u zvláštních zařízení a objektů i krátkodobých se zvýšeným důrazem na bezpečnost
- u vnitřních rozvodů u hlavních rozvaděčů,
- u vnitřních rozvodů u podružných rozvaděčů vzdálených 100m od nejbližšího místa uzemnění
- v distribuční soustavě - žádná HDS by neměla být vzdálena jak 100m od nejbližšího uzemnění,
- jednotlivá uzemnění - 15 Ω , 20m pásku
- uzemnění na koncích - 5 Ω , 50m pásku

Základní podmínka pro síť TN

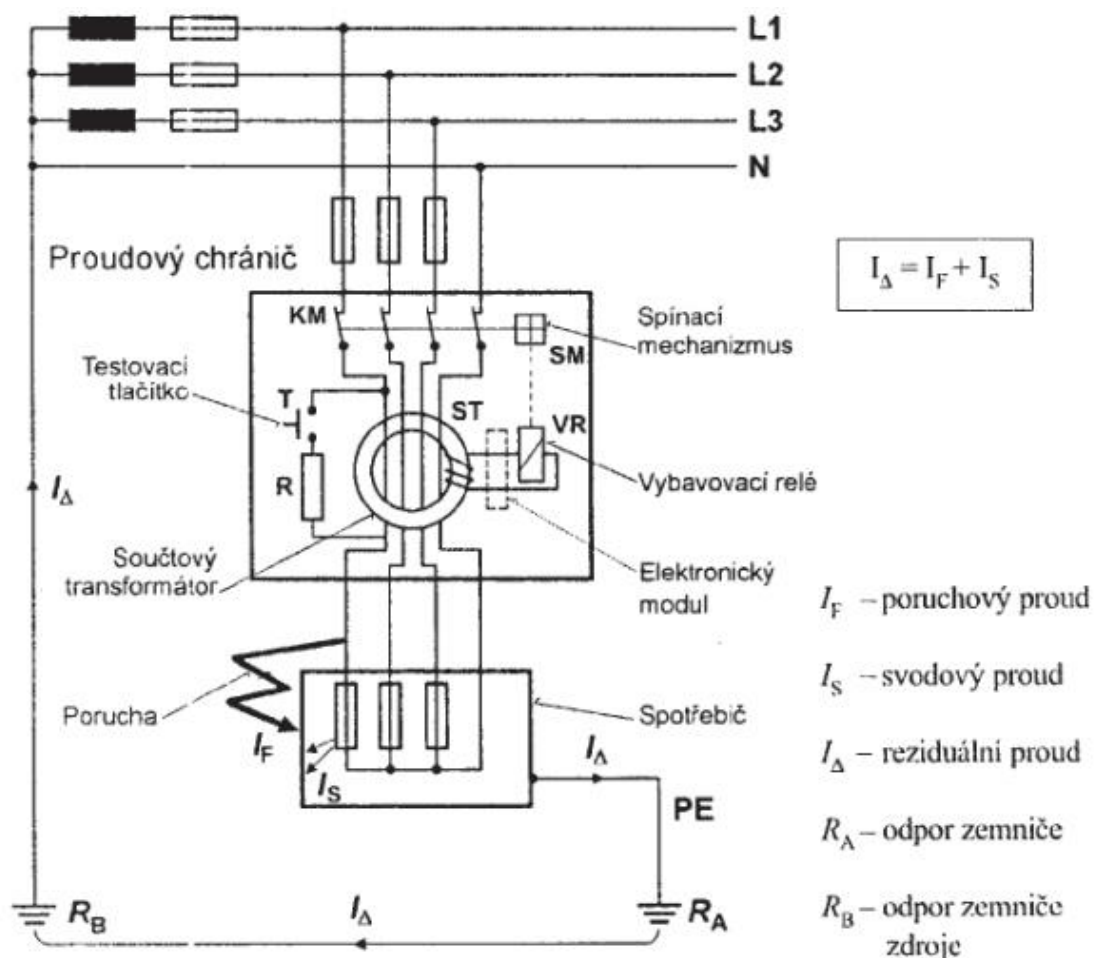
$$Z_s = 2/3 U_0/I_a$$

U_0 (V) je jmenovité napětí proti zemi (většinou 230V) I_a (A) je proud, který zařízení vypne v požadovaném čase - např. 0,4 s u sítě 230 V Z_s (Ω) je impedance **poruchové smyčky**

REVIZE A KONTROLY ELEKTRICKÝCH SPOTŘEBIČŮ

Izolační odpor

- 0,25 M Ω spotřebič tř. ochrany III
- 7 M Ω spotřebič tř. ochrany II držení v ruce Odpor ochranného vodiče
- 0,2 Ω při délce přívodu do 3m
- +0,1 Ω na každé započaté 3m, maximálně však 1 Ω Unikající (dotykový) proud
- 0,5 mA tř. ochrany II
- 3,5 mA spotřebiče tř. ochrany I



Zapojení a princip proudového chrániče v síti TT

Dvojitá izolace

Spotřebiče, které nemají kovový povrch, nepotřebují ochranný vodič, stejně tak dvě nezávislé vrstvy izolace, nebo zesílená izolace umožní pouze dvouvodičové napájení bez PE vodiče.

Příklady označení napájecích sítí (soustav)

- 3,PEN ~ 50 Hz, 400 V/ TN-C
- 3,PEN ~ 50 Hz, 230/400 V/ TN-C
- 3,N,PE ~ 50 Hz, 400 V/ TN-S
- 3,N,PE ~ 50 Hz, 400 V/ TN-C-S
- 3 ~ 50 Hz, 500 V/ IT

Označování vodičů soustava AC

- Fázové vodiče
 - značka L1,L2,L3
 - holé vodiče barva oranžová s černými pruhy
 - izolované vodiče barva hnědá, černá, šedá,
 - svorky na zařízení U, V, W
- Střední vodič – značka N – barva světle modrá
- Ochranné vodiče - značka PE – barva zelenožlutá
 - značka země v kruhu
- Vodič PEN • značka PEN
 - barva zelenožlutá s bleděmodrým označením na konci

Označování vodičů soustava DC

- kladný pól - tmavěčervená, černá či hnědá, L+, C +
- záporný pól - tmavěmodrá, černá či hnědá, L-, D –
- střední - světlemodrá, M
- vodič PEM – používá se v třívodičové soustavě
- Vodič PEL – používá se ve dvouvodičové soustavě

Od 1.2.2009 je předepsána **doplňková ochrana** proudovým chráničem u všech zásuvek přístupných laické obsluze, výjimky jsou pro spotřebiče, kde by vypnutí způsobilo větší škody (lednička, PC ...)

POŽADAVKY NA OCHRANU PŘI PORUŠE

- ochranné uzemnění (neživé části musejí být spojeny s ochranným vodičem)
- ochranné pospojování v budově • automatické odpojení v případě poruchy (v síti TN a napětí 230V proti zemi je to **do 0,4s**, distribuční síť **do 5s**)
- v instalacích pro laiky musí být doplňková ochrana u zásuvkových okruhů pomocí chráničů (existují i určité výjimky)

PŘEHLED OCHRANNÝCH OPATŘENÍ

- automatické odpojení od zdroje v síti TN, TT, IT, funkční malé napětí FELV
- dvojitá nebo zesílená izolace
- elektrické oddělení
- ochrana malým napětím SELV a PELV

LOKÁLNÍ ZDROJE

Ostrovní provoz se realizuje především s pojízdnými zdroji, daleko od pevných NN sítí. V armádních podmínkách se pojízdné zdroje používají už více než 100 let s aplikací mnohých praktických zkušeností z pole i z rozvoje technologií na obou stranách bojiště. Principem ale zůstává soustrojí spalovací motor a generátor. Moderní jednotka elektrocentrály EC je na Obr.

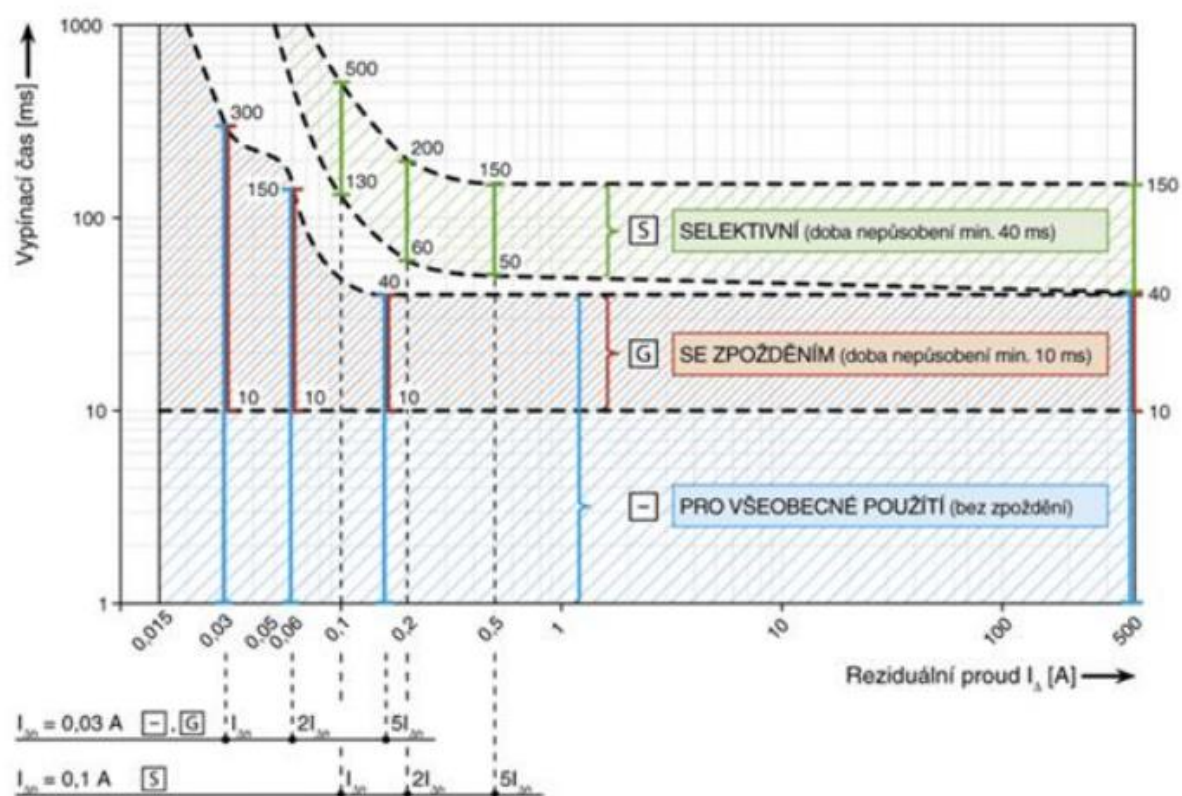
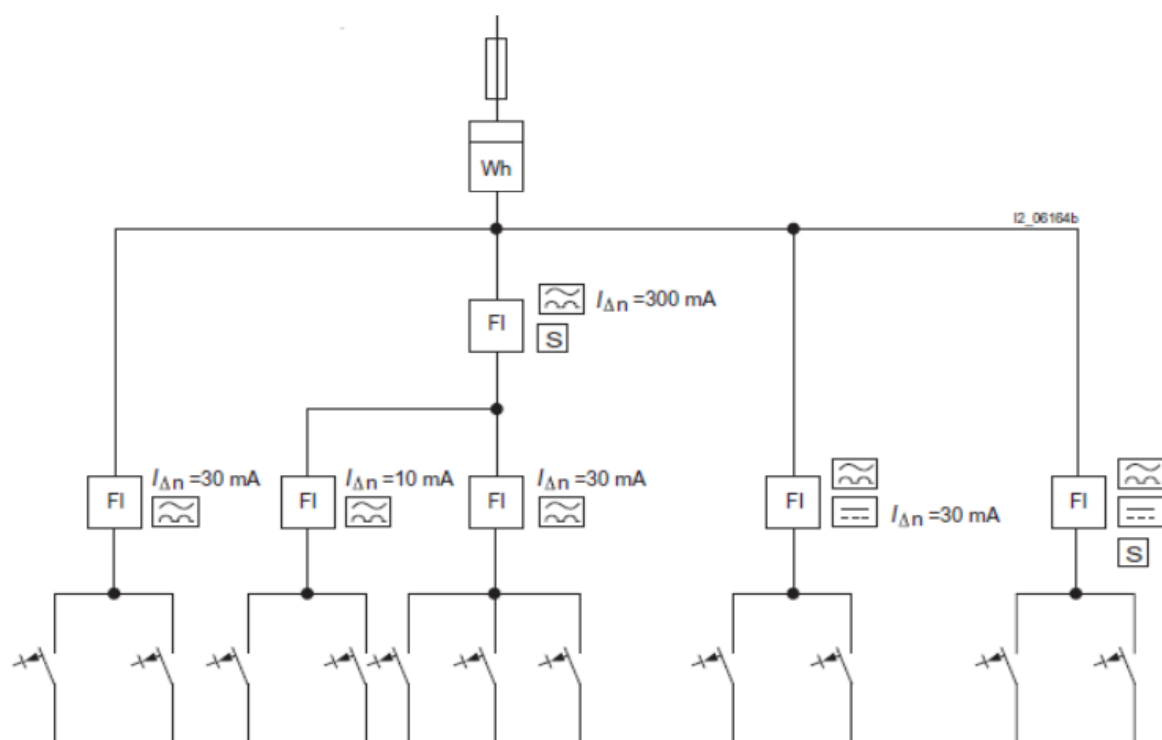
**Palubní síť**

Automobilní technika i pro nejtěžší vozidla používá bezpečné napětí $U_{DC} = 24V$ právě z důvodů bezpečného dotyku i ve **zvlášť nebezpečném prostředí**. Jiná situace je v instalacích na vagónech, lodích letadlech, kde se používá nebezpečné napětí v sítích IT, někde ještě specifických, kde mezi potenciálem země a kovovou karoserií jsou pneumatiky. Na vojenských vozidlech mohou být pojízdná pracoviště, která vyžadují napájení z převážených zdrojů na palubě nebo v přívěsu.

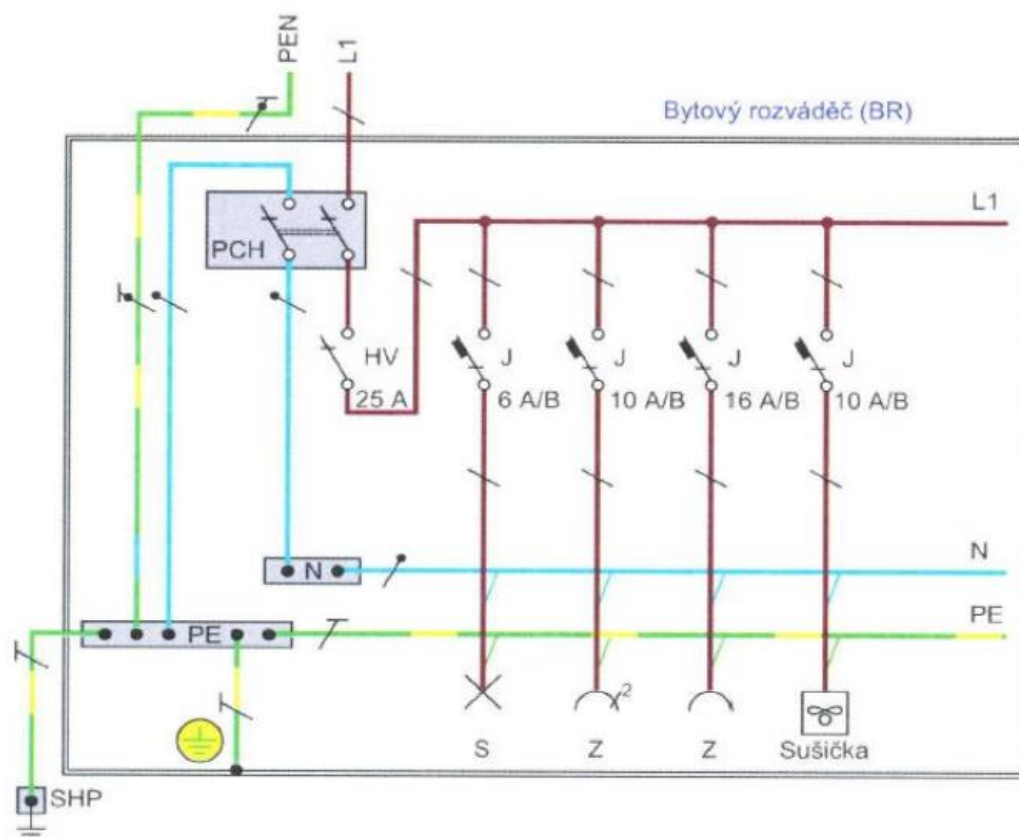
Záložní zdroje a UPS

Nemocnice, letiště, Metro, záchranáři, telekomunikace a mnoho dalších technologií a pracovišť nemůže spoléhat na dodávku EE z veřejné sítě a má záložní systémy s elektrochemickými bateriemi a motorgenerátory, které tvoří tzv. systém nepřetržitého napájení, známý též jako UPS (Uninterruptible Power Supply).

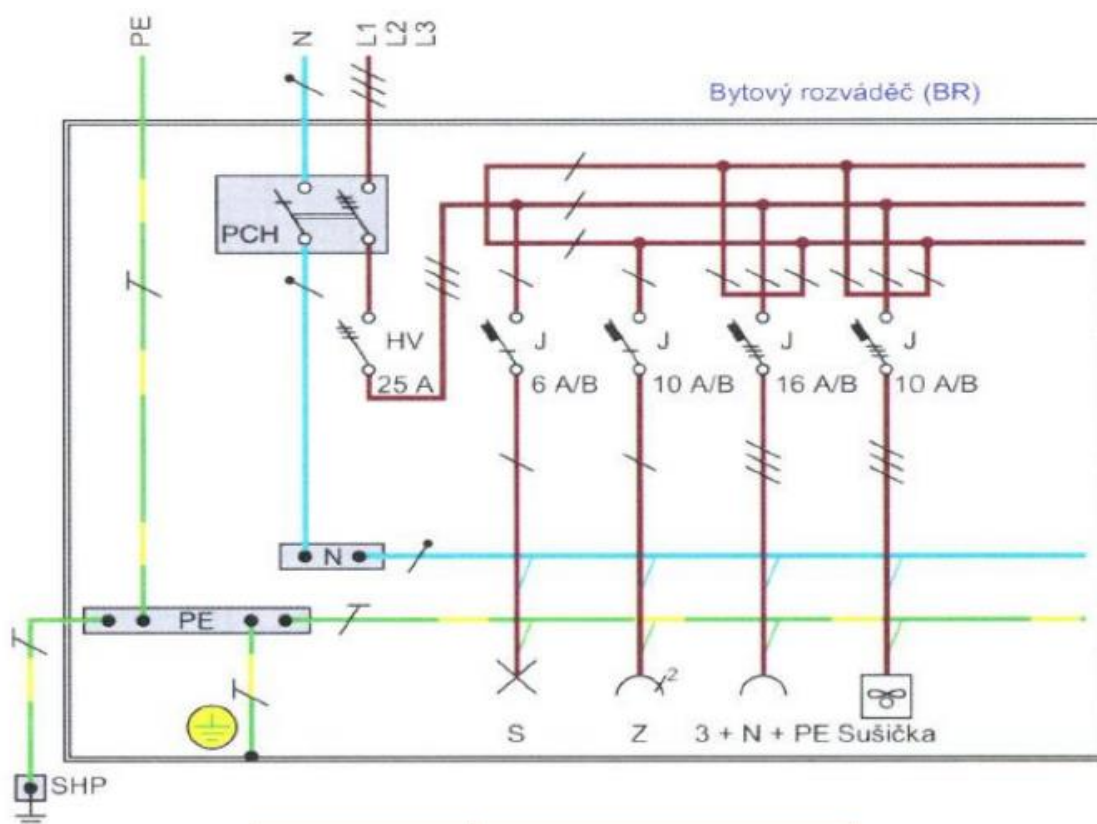
Ještě pár obrázků pro ilustraci...



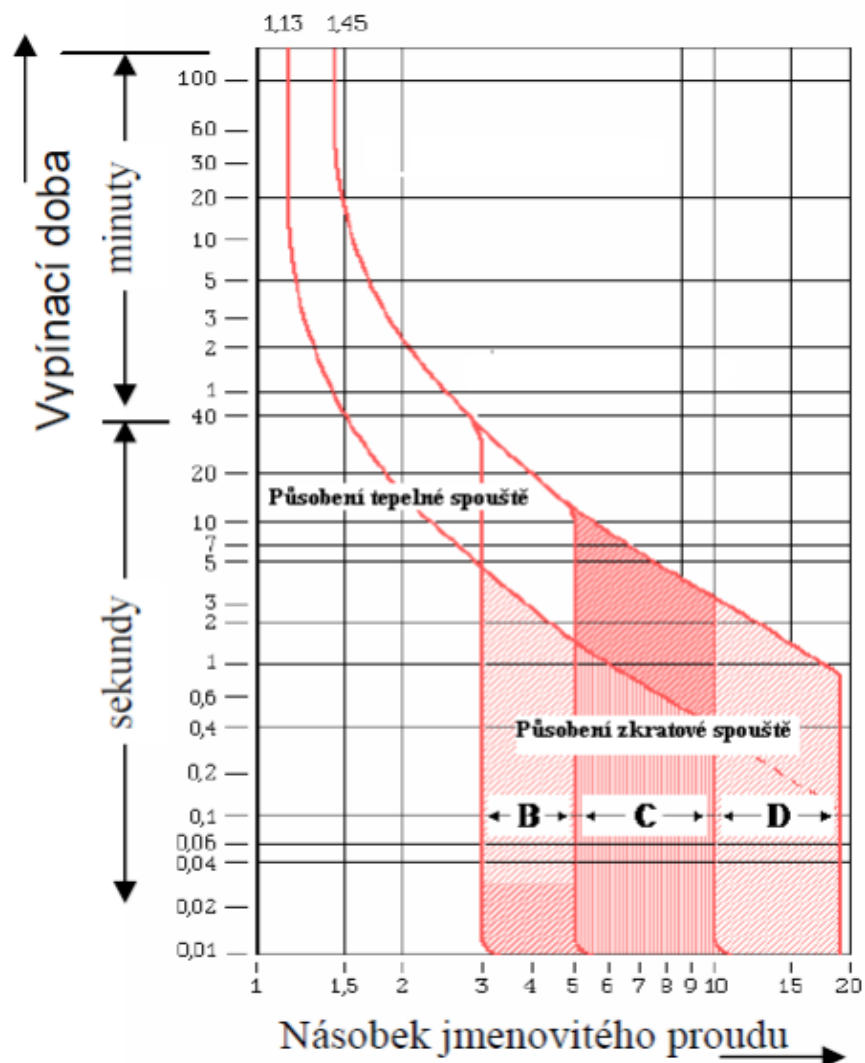
Vypínací charakteristiky Proudových Chráničů v selektivním systému



Zapojení PCH v bytové rozvodnici 1f síť TN-C-S



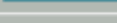
Zapojení PCH v bytové rozvodnici 3f síť TN-S



Charakteristiky jističů pro různé rozběhové proudy

TOP-10 ZEMÍ PODLE TĚŽBY ROPY NA KONCI ROKU 2014.				TOP-10 ZEMÍ PODLE SPOTŘEBY ROPY KE KONCI ROKU 2014.			
1	USA	11 644		1	USA	19 035	
2	Saúdská Arábie	11 505		2	Čína	11 056	
3	Rusko	10 838		3	Japonsko	4 298	
4	Kanada	4 292		4	Indie	3 846	
5	Čína	4 246		5	Brazílie	3 229	
6	SAE	3 712		6	Rusko	3 196	
7	Írán	3 614		7	Saúdská Arábie	3 185	
8	Irák	3 285		8	Jižní Korea	2 456	
9	Kuvajt	3 123		9	Kanada	2 371	
10	Mexiko	2 784		10	Německo	2 371	

Údaje v 1000 barelech za den

OBRAT SUROVÉ ROPY A ROPNÝCH PRODUKTŮ V ROCE 2014, MILIARD BARELŮ DENNĚ		
Země	Dovoz	Vývoz
USA	9 221 	4 099 
Kanada	1 162 	3 535 
Mexiko	641 	1 290 
Jižní a Střední Amerika	2 232 	3 929 
Evropa	12 601 	2 293 
Bývalý SSSR (včetně RF)	136 	8 933 
Blízký a Střední východ	1 134 	19 761 
Severní Afrika	715 	1 762 
Západní Afrika	394 	4 432 
Východní a Jižní Afrika	600 	202 
Austrálie	1 022 	310 
Čína	7 540 	547 
Indie	4 224 	1 282 
Japonsko	4 333 	278 
Singapur	3 056 	1 495 
Jiné země Asijsko-pacifického regionu	7 725 	2 589 
Celkový objem obratu	56 736	56 736

2. Magnetické obvody a elektromagnety

Magnetický obvod

Na rozdíl od elektrického obvodu je zde o několik řádů nižší rozdíl mezi vodičem a izolantem, magnetické materiály (feromagnetika) jsou proti vakuu nebo vzduchu vodivé maximálně 10 000x, častěji jen kolem 1000x, takže v praxi je téměř vždy rozptylový tok.

Na rozdíl od elektrického proudu se magnetický tok nemůže hromadit ve formě náboje, jinak v analogii platí Ohmův zákon a další podobnosti:

$U = R I$	$U_m = R_m \Phi$	
$R = \rho l/S$	$G_m = \mu S/l$	Permeabilita je vlastně magnetická vodivost
$I = \int J dS$	$\Phi = \int B dS$	Magnetická indukce B (anglicky Flux density) je vlastně hustota toku – analog proudové hustoty ve vodiči
$U = \int E dl$	$U_m = \int H dl$	E [V/m] a H [A/m] jsou intenzity pole... určující spád napětí...

Permanentní magnety v našem krátkém kurzu řešit nebudeme, takže zdrojem magnetického toku bude vždy elektrický proud, který prochází vnitřkem magnetického obvodu (uzavřené silokřivky), když proud prochází cívkou o N závitů, tak magnetické napětí od této cívky je

$$U_m = N I$$

... rozměr magnetického napětí [A] je dobré vnímat v duchu staršího označení *Ampér-závit*.

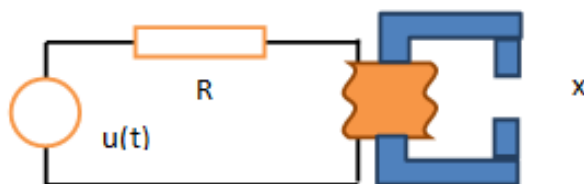
Elektromagnetická soustava

Přeměna ME na EE a opačně je založena na proudovodiči v magnetickém poli, neboli na vzájemném působení magnetických polí, takže elektromechaniku začneme hlubším pohledem na vznik tohoto pole, jeho jednotek, veličin a energie.

Zopakujeme si vztah mezi magnetickým tokem a proudem, který slouží k definici indukčnosti. Dále budeme pracovat se vztahem pro indukované napětí, které zásadně vzniká časovou změnou toku:

$$U_i = N d\Phi / dt$$

Kde je N je počet závitů cívky a Φ je tok jádrem, v teorii se někdy pracuje s pojmem **spřaženého toku** $\Psi = N \Phi$, ale tato představa toku, který je spřažen s blánou vytvářející šroubovicovou plochu přes všechny N závitů cívky je zbytečně náročná. Když je v cívkě feromagnetické (nebo též železné) jádro, jehož permeabilita je i více než tisíc krát vyšší než permeabilita vzduchu, můžeme paralelní tok vzduchem v prostoru mezi cívkou a jádrem v prvním přiblížení zanedbat. V dalším budeme sledovat, jak se rozloží magnetická energie v obvodu se vzduchovou mezerou a vztah mezi energií magnetického pole a dodávanou EE.



Obr 2-1 Magnetický obvod s konstantní vzduchovou mezerou

Cívka je vždy z reálného vodiče a má tedy nějaký odpor. Když ji připojíme na zdroj napětí $u(t)$ lze podle II. K.z. napsat rovnici:

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d\psi}{dt}$$

Po rozšíření rovnice vynásobením $i(t) dt$ dostaneme rovnici energií:

$$u(t)i(t)dt = Ri^2(t)dt + i(t)d\psi$$

$$dW_e = dW_{\text{joule}} + dW_{\text{MAG}}$$

Na levé straně je energie dodávaná ze zdroje EE, na pravé straně je ztrátová energie v odporu, která se proměnila na teplo, budeme ji dále nazývat Joulovy ztráty a poslední člen je magnetická energie. Všimněme si, že zde chybí čas na rozdíl od prvních dvou členů a tak s časem magnetická energie neroste, pokud tedy napájíme budící cívku DC proudem, po odeznění přechodného děje je ustálený proud $I = U/R$, tok je konstantní a celý dodávaný výkon se mění na Joulovy ztráty.

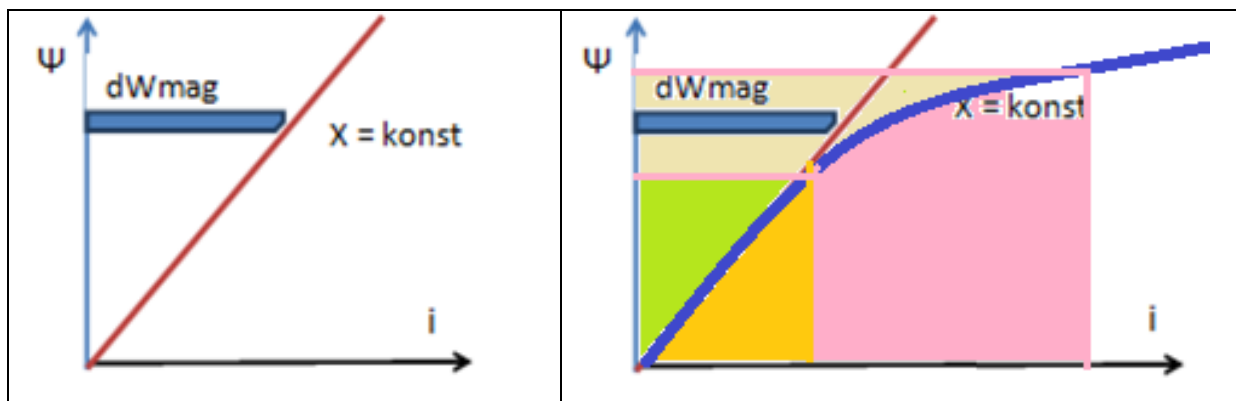
Mezi tokem a proudem není žádná setrvačnost, není proud, není tok, závislost mezi veličinami byla probrána v ZEVE1 při definování indukčnosti L. připomenu základní vztah:

$$\Psi = N \Phi = L i$$

S touto substitucí dostaneme pro přírůstek magnetické energie:

$$dW_{\text{MAG}} = N i(t) d\Phi = U_{\text{MAG}} d\Phi$$

Integrál magnetické energie $\int i(\psi) d\psi$ pro lineární funkci je trojúhelníková plocha nad charakteristikou obvodu (Obr) $W_{\text{MAG}} = \frac{1}{2} \Psi I$, plocha pod charakteristikou se nazývá koenergie, v lineárních obvodech jsou stejně veliké, ale s reálným železem, které se přesytí, plocha nad charakteristikou už téměř neroste a zvyšování proudu nevede ke zvyšování toku, takže W_{mag} už téměř neroste a zvyšuje se pouze koenergie v systému.



Obr. 2 – 2 závislost toku na proudu, magnetická energie a koenergie, vliv nasycení

Pro lineární systém lze velikost magnetické energie napsat:

$$W_{\text{MAG}} = \frac{1}{2} U_{\text{MAG}} \Phi = \frac{1}{2} H l B S = \frac{1}{2} B H S l = \frac{1}{2} B H V = w_{\text{MAG}} V$$

Zavedením lokálních veličin B a H se dostáváme k hustotě magnetické energie w_{MAG} [W/kg] a $S \cdot l$ je objem prostoru (vzduchové mezery v obvodu) kde je energie uložena.

S použitím Ohmova zákona pro mg obvod lze psát také:

$$W_{\text{MAG}} = \frac{1}{2} R_{\text{MAG}} \Phi^2 = \frac{1}{2} G_{\text{MAG}} U_{\text{MAG}}^2$$

$$w_{\text{MAG}} = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} B^2 / \mu_0$$

Kde je uložena magnetická energie?

Předpokládejme stejný průřez po celém obvodu a pak vyjde i stejná indukce B jak v železe tak ve vzduchové mezeře.

$$\Phi = B S \quad \text{když} \quad S_{Fe} = S_x \quad \text{tak} \quad B_{Fe} = B_x$$

Magnetické napětí se pak rozdělí na železo a vzduchovou mezeru:

$$U_{mag} = \oint H dl = H_{Fe} l_{Fe} + H_x x$$

A jelikož H_{Fe} je tisícinu H_δ , lze v prvním přiblížení uvažovat, že celé magnetické napětí a tedy i celá energie magnetického pole bude uložena (soustředěna právě ve vzduchové mezeře!

$$B = \mu H$$

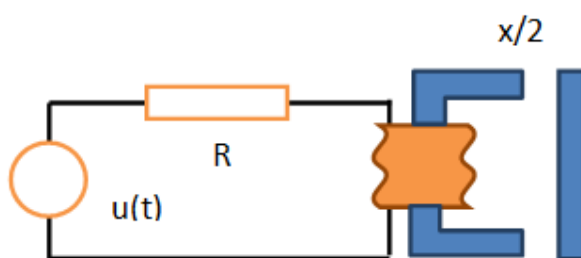
$$\mu_{Fe} = 1000 \mu_0$$

$$H_{Fe} = H_x / 1000$$

celá energie je v mezeře!!!

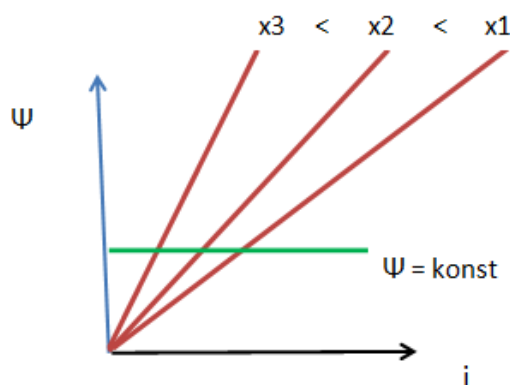
Elektromechanická soustava

V dalším zkoumaném případě upravíme konfiguraci magnetického obvodu tak, že se obvod rozpadne na dvě části, oddělené vzduchovou mezerou $x/2$, takže celková délka vzduchové mezery zůstane zachována.



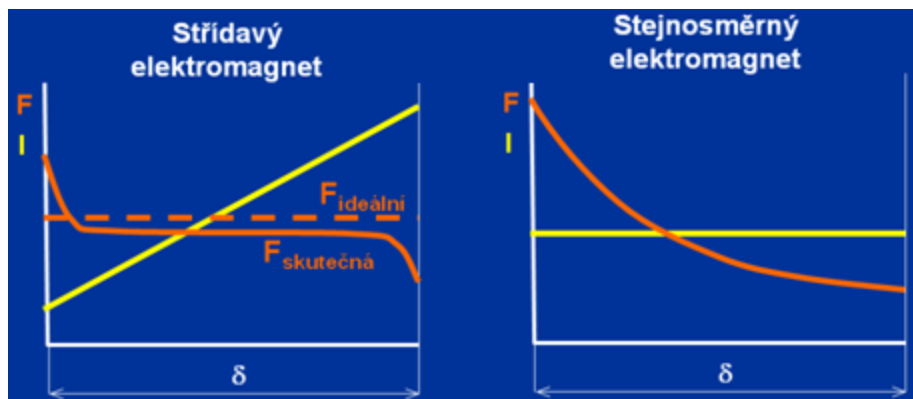
Magnetický obvod s celkovou mezerou x rozdělenou tak, aby umožnila pohyb „kotvičky“

Ze zkušenosti víme, že po zapnutí proudu do cívky se části magnetického obvodu začnou přitahovat. Z čeho vznikla přitažlivá síla? Ze snahy systému snížit energii, která je ve vzduchové mezeře, to znamená, že z magnetické energie vznikne mechanická energie (práce $A = F x$).



Charakteristiky $\Psi - i$ se mění se změnou (zmenšováním) vzduchové mezery

Při konstantním toku podle zelené čáry dochází ke zmenšení magnetické energie – plocha trojúhelníčku nad charakteristikou se zmenšuje se zmenšováním mezery (x). Také se zmenšuje proud ze zdroje. Takto se chová **střídavý elektromagnet**, protože s menší vzduchovou mezerou je větší magnetická vodivost a tedy i indukčnost cívky. Nakonec převážná část napětí je na reaktanci cívky a úbytek na odporu je nepodstatný.



Srovnání síly a proudu v závislosti na velikosti mezery pro AC a DC magnet

U stejnosměrného magnetu je proud konstantní, protože ho omezuje jen odpor vinutí a tak (pokud neuvažujeme nelinearitu magnetického obvodu a přesycení železa) se zmenšováním vzduchové mezery tok stále roste a následně i přitažlivá síla.

DC	AC
$I = U / R = \text{konstant}$	$I = U / Z = U / \sqrt{R^2 + X^2}$
$NI = \text{konstant}$	$L = G_{\text{mag}} N^2 = \text{roste}$
$B \text{ --- roste!!!}$	
$F \text{ --- roste!!!}$	

Střídavý magnet

Zatím jsme střídavý magnet chválili, protože udržuje konstantní tok a tedy i přitažlivou sílu, jeho negativem je, že síla je časově proměnná s frekvencí $2f$. Stačí si udělat průběh Φ^2 a vidíme, že pro $f = 50\text{Hz}$ síla 100x za sekundu klesne na nulu a to způsobí hlučnost (drnění) takového magnetu.

K odstranění tohoto jevu se prakticky používá **závit nakrátko** zabírající s částí magnetického toku. Který vytvoří tok fázově posunutý a tím další sílu, která se sečte s původní.



Tok závitu nakrátko je fázově posunutý, sílu vlevo tvoří tok $\Phi + \Phi_k$ a vpravo $\Phi - \Phi_k$ i (fázově sečtené!)

Ještě jedna poznámka ke střídavému magnetu a střídavému toku všeobecně. Železo je také dobrý vodič elektriky a tak při střídavém přemagnetování se v něm objevují vířivé proudy, které omezíme listováním železa na tenké, vzájemně izolované plechy, aby se omezily ztráty vířivými proudy. Plechy musí být z magneticky měkkého materiálu s velmi úzkou hysterezní smyčkou.

Když znovu napíšeme rovnici pro obvod s proměnnou vzduchovou mezerou:

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d\psi(i, x)}{dt}$$

je indukované napětí funkcí dvou proměnných. Pak musíme použít parciální derivaci:

$$u_i(t) = \frac{d\psi(i, x)}{dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt}$$

Transformační + pohybové

Jak vidíme, dostaneme dvě složky indukovaného napětí, obě jsou od časové změny toku (to je univerzální základ!), ale jednou je časová změna způsobena pohybem – rychlost $v = dx/dt$, podruhé střídavým proudem, který vytváří střídavý tok...

Sílu, kterou se přitahuje kotvička, dostaneme z úbytku magnetické energie, takže pokud je energie magnetická $W_{MAG} = \frac{1}{2} U_{MAG} \Phi = \frac{1}{2} H x B S$ a mechanická $W_{MECH} = F x$, tak porovnáním dostaneme přitažlivou sílu:

$$F = \frac{1}{2} B H S = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 S = B^2 S / (2\mu_0)$$

Elektrické stroje požívají zásadně magnetickou složku ELMAG pole, a to právě z důvodu hustoty energie, porovnejme si tyto hustoty, respektive rovnou síly, které dostaneme na plochu $1m^2$:

ELMAG	ELSTAT
B = 1T	E = 30kV/cm = 3E6 V/m
$W = \frac{1}{2} L i^2$	$W = \frac{1}{2} C u^2$
$W = \frac{1}{2} B H S x$	$W = \frac{1}{2} D E S x$
$F = \frac{1}{2} B^2 S / \mu_0$	$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 S$
$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$	$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$
S = 1 m ²	
F = 397 kN	F = 40N

není to o rozměrech ani objemu, existují elektrické stroje piezoelektrické i **mikro nebo nano stroje** založené na silách elektrostatických, ale ty nebudou objektem našeho studia...

ELEKTROMAGNET je nejjednodušší měnič EE na mechanickou energii, ale obecně není použitelný v obou směrech přeměny energie a v principu ELEKTROMOTOR nebude kopií pístového motoru, i když si lze představit konstrukci:

Elektromagnet + klika >>> rotační motor

ES = Turbína a ne klika!!!

Síla v elektromagnetu vzniká jen na základě změny magnetické vodivosti a nazývá se v elektrických strojích také **reluktanční silou**. Další síla vzniká na proudovodič v magnetickém poli (podle Lenzova pravidla levé ruky). Tento jev se dá také vysvětlit jako vzájemné působení dvou magnetů a tato síla je základem většiny ES, které mají typicky **2 elektrické obvody** vázány jediným společným magnetickým tokem – tedy jediným magnetickým obvodem, který musí být u točivých strojů přerušen vzduchovou mezerou. U transformátorů je vzduchová mezera zbytečná a tudíž se minimalizuje na technologické minimum dané stříhem plechů, mezera úplně odpadá u vinutého toroidu.

Obecný ELEKTRICKÝ STROJ:

$x = 0$ **TRANSFORMÁTOR**

$u_1 i_1 = u_2 i_2$

A primár

B sekundár

(EE $\leftrightarrow$ EE)

$x = \delta$ **motor / generátor**

$u_B i_B$

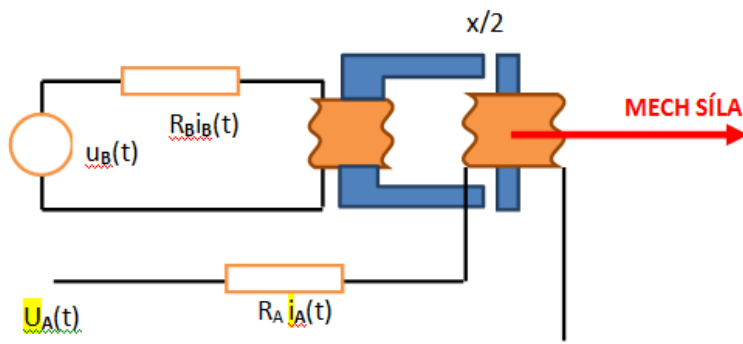
B buzení

tvoří magnetické pole

$u_A i_A$

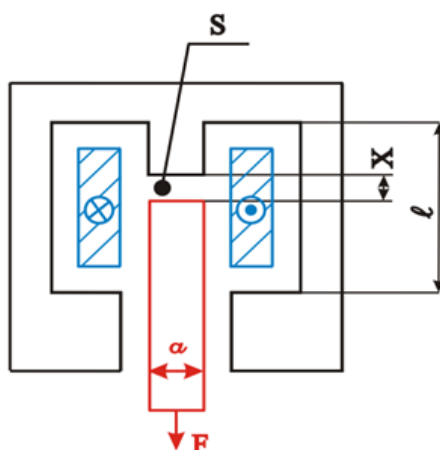
A kotva

(EE $\leftrightarrow$ MechE)



Obecný ES má 2 elektrické obvody vázané obvodem magnetickým

Když si představíme na obrázku polarizaci obou vinutí stejným směrem např. zdola nahoru, tak se stejné póly odpuzují a pohyblivá část se bude snažit otočit (shora dolů a naopak). Jedno vinutí se pak nazývá **buzení** a bude mít indexy (b), druhé **kotva** a bude mít indexy (a) např. I_b , R_a , U_a ...



Uspořádání elektromagnetu s jednou pracovní mezerou

Elektrické stroje

Aktivní materiály vinutí jsou již víc než století stejných vlastností kovových vodičů (měď, hliník), vlastnosti ocelových materiálů se několikrát změnily díky technologii v metalurgii a válcování plechů.

Izolační materiály tvoří jednotky procent z hmotnosti ES, ale často až polovinu ceny a právě jejich vlastnosti umožňují neustálé postupné zlepšování parametrů ES. Je to jednak jejich tepelná odolnost, podle které jsou rozděleny do několika tříd:

Tepelné třídy

Y, A, E, B, F, H, C

Dále se žádá vysoká elektrická pevnost [kV/mm], aby stačila co nejtenčí vrstva izolace, dále pružnost, mechanická pevnost, nenavlhavost, chemická stálost, tepelná vodivost atd... rozlišujeme několik

skupin, jako jsou izolace vodičů, drážkové izolace, izolační desky, pásky, impregnace, kapalná a plynná izolace atd.

Zatěžovatel ES

Ne všechny stroje se navrhují na **trvalý chod** s konstantním výkonem, existuje zatěžování krátkodobé, třeba každé ráno 10 minut, nebo cyklické, třeba výtah, nebo hodinový maximální výkon třeba v trakci do táhlého stoupání atd. vždy jde o nepřekročení teplotního namáhání izolace. Zlepšením chlazení můžeme zvýšit zatížení bez ohrožení funkce ES.

Krytí ES

STUPNĚ OCHRANY KRYTEM (KRYTÍ - IP KÓD)

IP	prvá číslice znamená stupeň ochrany před nebezpečným dotykem a vniknutí cizích předmětů	druhá číslice znamená stupeň ochrany před vniknutím vody
00	• 0- bez ochrany	• 0 bez ochrany
	• 1- 50mm (ruka),	• 1- padající,
	• 2- 12 mm (prst),	• 2- padající do 15°odklonu,
	• 3 - 2,5mm (náradí),	• 3 - padající do 60°odklonu (déšť),
	• 4- 1mm (drát),	• 4- stříkající,
	• 5- prach částečně	• 5 - tryskající,
	• 6- prach úplně	• 6 - vlnobití,
67		• 7 - ponoření do tlaku a hloubky,
68		• 8 - trvalé ponoření
69		• 9 - vysokotlaká tryskající horká voda

Existují ještě doplňkové písmena např. IPxx.B

Základní pravidlo: Nebezpečné živé části nesmí být přístupné a přístupné vodivé části nesmí být nebezpečně živé

- za normálních podmínek (provoz bez poruchy při určeném použití)
- za podmínek jedné poruchy

Strojní části jako hřídele ložiska přírubby kryty větráky odlitky držáky atd. jsou zas mimo rozsah tohoto kurzu a seznámíte se s nimi v jiných předmětech.

3. TRANSFORMÁTORY

Transformátor NENÍ v pravém slova smyslu STROJ, protože mění EE zas na EE a to o stejném kmitočtu. Ale odpovídá definici dvou elektrických obvodů spojených magneticky a začneme s ním, protože zatím vystačíme jen se znalostmi z předmětu ZE bez mechanických veličin. Takže začneme rozbořem ideálního transformátoru, napřed si ale připomeňme složky indukovaného napětí

$$u_i(t) = \frac{d\psi(i,x)}{dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = N d\Phi / dt \quad \text{jen TRANSFORMAČNÍ!!!}$$

Pro harmonický magnetický tok

$$\Phi = \Phi_{MAX} \sin(\omega t)$$

Dostaneme derivaci:

$$U = N d\Phi / dt = N \omega \Phi_{MAX} \cos(\omega t) \quad 90^\circ \text{ posun!}$$

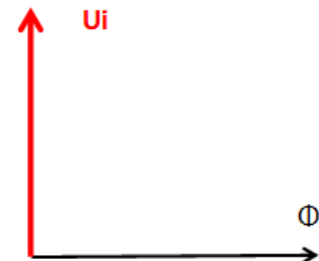
Všimněme si, že pro sinusový průběh toku dostaneme kosinusové napětí, tedy fázový posun, kdy indukované napětí předbíhá tok vždy o 90° !

Maximální hodnota harmonického napětí je

$$U_{MAX} = N 2\pi f \Phi_{MAX}$$

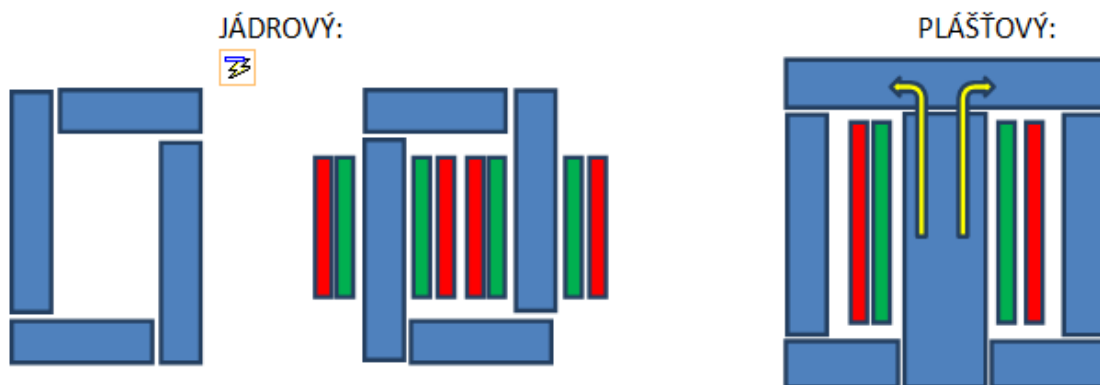
Ale nás zajímá efektivní hodnota, která je $U_{MAX}/\sqrt{2}$, takže po dosazení:

$$U_{ef} = \sqrt{2} \pi f \Phi_{MAX} N = 4,44 f B_{MAX} S_{Fe} N.$$



Jednofázový transformátor

Existují dvě zásadní řešení podle uspořádání magnetického obvodu – buď jádrový, nebo plášťový:



Dále hovoříme o sloupu a spojce, celý obvod je listovaný aby se omezily vířivé ztráty, trafoplechy se dělají v tloušťce 0,35mm buď za tepla válcované (izotropní), nebo za studena válcované s orientovanou strukturou, které ve směru válcování vykazují lepší magnetické vlastnosti. Pro snížení elektrické vodivosti (a vířivých ztrát...) se dotují křemíkem, což zase zvyšuje mechanickou tvrdost. Magneticky musí být materiál měkký s úzkou hysterezní smyčkou, vysokou hodnotou nasycení a vysokou permeabilitou. Na obrázku jádrového typu vidíte překládání vrstev, aby se překryli (těsné) mezery v obvodu sousedními plechy, u plášťového je další vrstva vertikálně překlopena. V obrázku

jsou vyznačena vždy dvě vinutí – **primár** a **sekundár** (odlišené barevně). V případě jádrového je výhodné obě vinutí rozdělit na polovinu, čím jednak omezíme spotřebu vodiče a zlepšíme magnetickou vazbu, transformátor bude tvrdší zdroj.

IDEÁLNÍ TRANSFORMÁTOR:

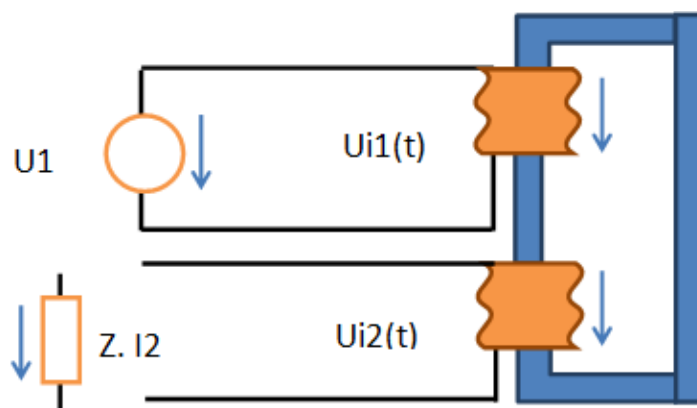
Teoretický rozbor ideálního TRAFA uděláme za třech podmínek:

1. MAGNETICKÝ OBVOD NEKONEČNĚ VODIVÝ $\mu = \infty$
2. VINUTÍ NEKONEČNĚ VODIVÉ ELEKTRICKY! $R = 0$ žádné Joulovy ztráty!
3. NULOVÝ ROZPTYLOVÝ TOK vyplývá z bodu 1. žádný tok nepoteče méně vodivým vzduchem, když má nekonečně vodivou cestu železem!!!

Máme dvě cívky s počtem závitů N_1 a N_2 , oběma protéká stejný tok, ať jsou kdekoli na jádře, protože ani jedna siločára neuhne z nekonečně vodivého jádra. Indukované napětí v obou cívkách bude v poměru

$$U_1 / U_2 = N_1 / N_2 = p$$

Poměr $N_1 / N_2 = p$ nazýváme **převod** TRAFA!!!



Když první cívku připojíme ke zdroji napětí U_1 tak U_{i1} bude stejně velké a jelikož je jádro nekonečně vodivé, tak pro konečný tok musí být NULOVÉ magnetické napětí a tedy

$$N_1 I_{10} = 0$$

Co se stane, když ke druhé cívkce na které se indukuje U_{i2} připojíme zátěž Z ? Touto cívkou začne protékat proud $I_2 = U_{i2} / Z$ a ten by nenulovým $N_2 I_2$ vytvořil nekonečný tok v jádře. Aby zůstal (původní) konečný tok musí zůstat **původní (nulové!) magnetické napětí**, takže:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

To znamená, že ze zdroje U_1 musí být dodán proud I_1 , který bude přesně v protifázi a vykompenzuje proud do zátěže trafa.

$$I_1 = - (N_2 / N_1) I_2 \quad \text{nebo:} \quad I_2 = (N_1 / N_2) I_1 = p I_1$$

zopakujeme si nyní, co víme ze základní školy, že vstupující výkon se rovná vystupujícímu (při 100% účinnosti), tedy že

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

A odtud dostaneme stejný vztah s tím, že zde nevidíme tu protifázi proudů.

Z bodu 1 vyplývá, že při nekonečné vodivosti k protlačení konečného toku Φ je potřeba jen nulové magnetické napětí (pro větší než nulové by vyšel nekonečný tok a tedy i U_1)

Nulové magnetické napětí znamená, že cívka N_1 ze zdroje U_1 odebírá **nulový proud**. Napětí zdroje a napětí, které se indukuje v cívkách, jsou stejné:

$$U_1 = U_{i1}$$

Napětí ve druhé cívkě s počtem závitů N_2 bez zátěže je ve vztahu k napětí v první cívkě:

Když k sekundáru připojíme zátěž, tak sekundárem protéká proud:

$$I_2 = U_2 / Z$$

A ten vytvoří magnetické napětí **$N_2 I_2$** tím dojde k **porušení magnetické rovnováhy**, které by vedlo k nekonečnému toku!!! A nekonečný tok znamená nekonečnou indukovanou napětí!!!

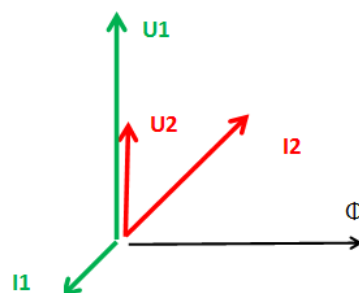
Zdroj – napájející cívku N_1 proto musí dodat takový proud, aby byla rovnováha zachována:

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$$

Tím se zachová konečný tok Φ ,
a také výkonová rovnováha

Příklad:

$U_1 = 20V$	$U_2 = 10V$
$I_2 = 10A$	$I_1 = 5A$ zachování výkonu
DODAVATEL	SPOTŘEBITEL
$\varphi + 180^\circ$	φ



PŘEPOČET na PRIMÁRNÍ STRANU!!!

ZAVEDEME:

$$U_2 (N_1/N_2) = U_2'' = U_1$$

$$I_2 (N_2/N_1) = I_2'' = I_1$$

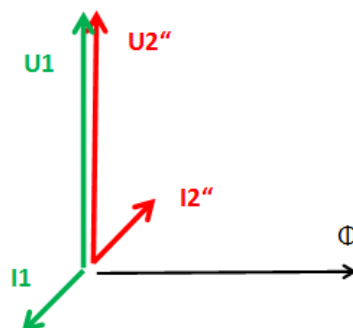
Výkon přepočítaný a nepřepočítaný je stejný

Výhoda je kreslení při větších převodech, třeba:

$$10\,000V / 400V$$

$$40A / 1000A$$

$$400\,kVA$$



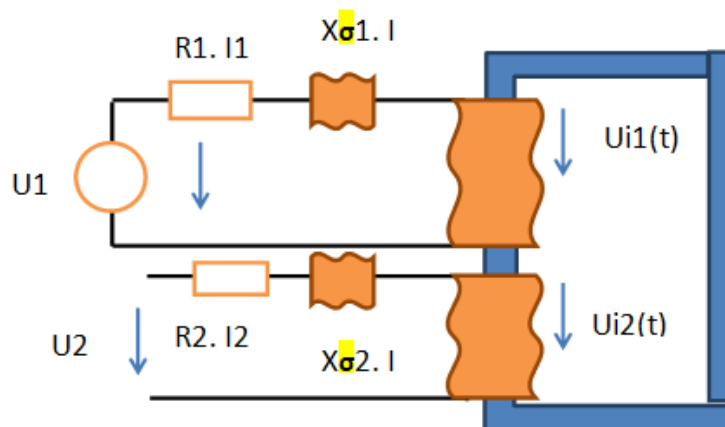
POZOR !!!

JEN PRO IDEÁLNÍ TRAFO

REÁLNÉ TRAFO**R1, R2** = JOULE-ovy ztrátyNENULOVÝ **Magnetizační proud** i ve stavu bez zatížení+ **ZTRÁTY v železe**

$$\Phi = \Phi_{\text{MAGNETIZAČNÍ}} + \Phi_{\text{ROZPTYLOVÝ}}$$

$$N \Phi = L i = (L_{\mu} + L_{\sigma}) i \quad \text{tok JÁDREM a ROZPTYLEM (nezabírá s druhým vinutím!)}$$



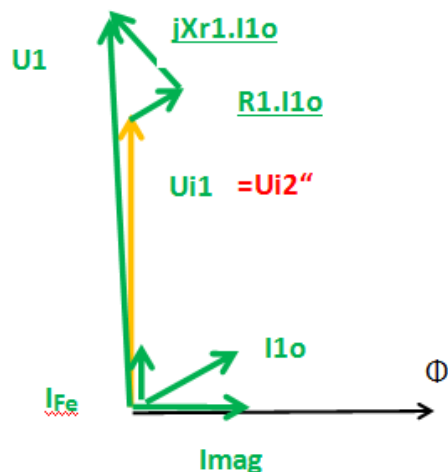
$$U_{i1}/U_{i2} = N_1/N_2 \quad !!!$$

NAPRÁZDNO

1. Nenulový proud pro vybuzení
2. Ztráty v železe
3. $U_1 > U_{i1}$ úbytek $R_1 I_{10} + jX_{r1} I_{10}$

PŘEVOD platí pro vnitřní napětí!!!

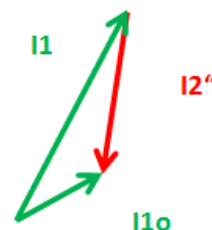
$$U_{20} = U_{i2}$$

a když zatížíme? $U_2 < U_{i2}$ **MAGNETICKÁ ROVNOVÁHA**

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = N_1 I_{10}$$

$$I_1 + (N_2/N_1) I_2 = I_{10}$$

$$I_1 + I_2'' = I_{10}$$



Umíme přepočet U a I, jak přepočítat R a X?

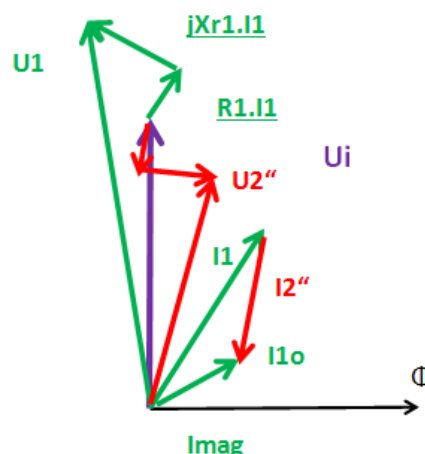
Zachovat výkonové poměry:

$$R_2 I_2^2 = R_2'' (I_2'')^2$$

Odtud dostaneme:

$$R_2'' = R_2 (N_1/N_2)^2$$

A stejný přepočet se použije i pro jalovou složku impedance, tedy rozptylovou reaktanci sekundáru.



PŘEVOD platí pro vnitřní napětí!!!

$$U_{2o} = U_{i2}$$

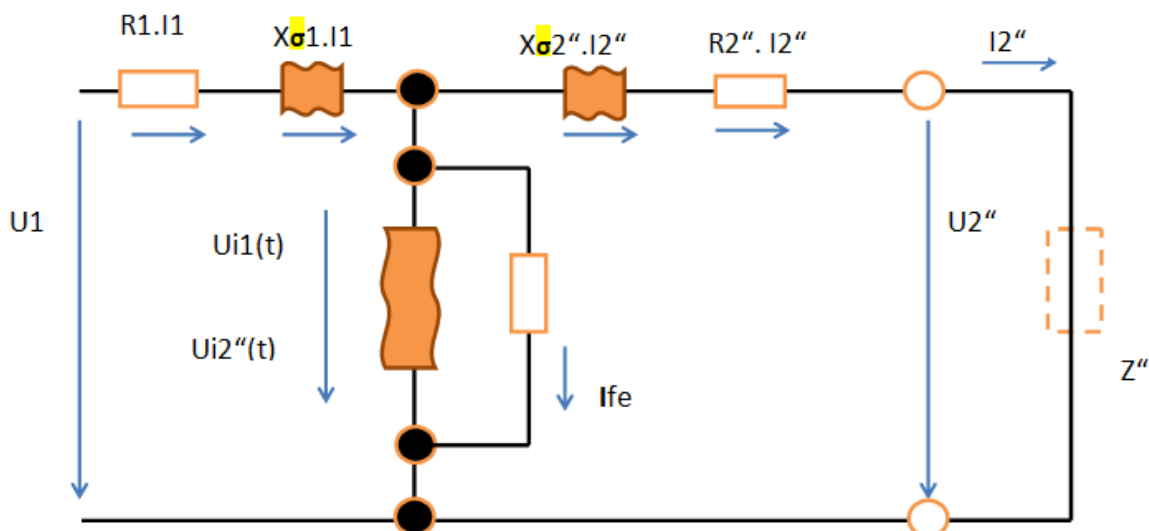
a když zatížíme? Tak $U_2 < U_{i2}$ (zde to není tak jednoznačné jako u DC zdroje, protože musíme brát do úvahy fázové poměry).

možnost odstranit magnetickou vazbu, pokud $U_{i1} = U_{i2}''$

aby měl I_o i činnou složku, je třeba doplnit odpor R_{Fe}

ten představuje ztráty v železe a **nelze ho změřit** jako odpor vinutí **ohmmetrem**

NÁHRADNÍ SCHÉMA:



AUTOTRANSFORMÁTOR

Ne s plynulou regulací, jako máte v laboratoři, ale pro pevný převod!

Příklad:

Máme $U_1 = 200V$, a chceme $U_2 = 220V$ pro odběr $I_2 = 10A$.

Výstupní výkon (zdánlivý): $P_{s2} = 2\,200\,VA$

Neuvažujíc ztráty je P_{s1} stejný a proud $I_1 = 2200/200 = 11A$

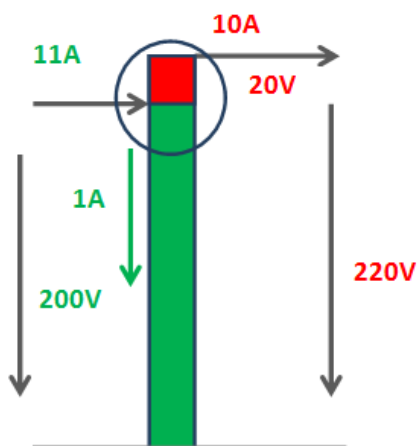
vinutí I.

$$200V \cdot 1A = 200VA$$

vinutí II.

$$20V \cdot 10A = 200VA$$

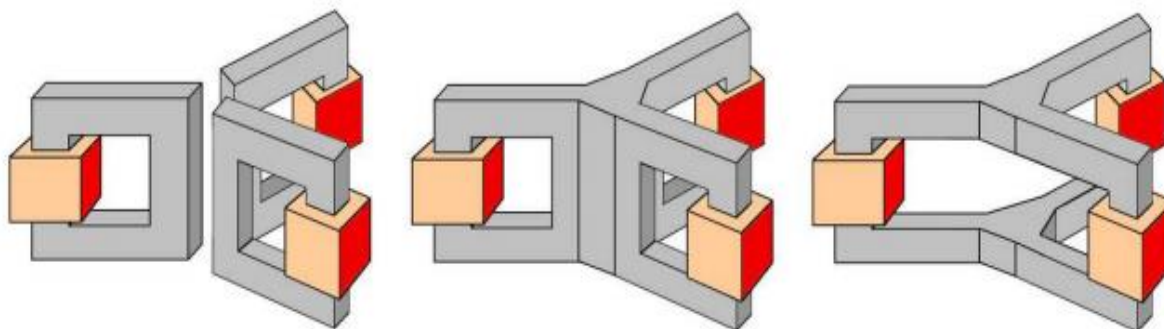
Na přenesení PRŮCHOZÍHO VÝKONU 2200VA, stačí TYPOVÝ VÝKON (VNITŘNÍ – který určuje rozměry!) **200VA**, sami si zkuste jiné verze AT, třeba snížovací a s jinými převody. Nebezpečné jsou zejména snížovací AT, protože chybí galvanické oddělení a při přerušení dolní části vinutí (zelené), se přes malou impedanci horního (červeného) vinutí přeneše na zátěž nebezpečné napětí!



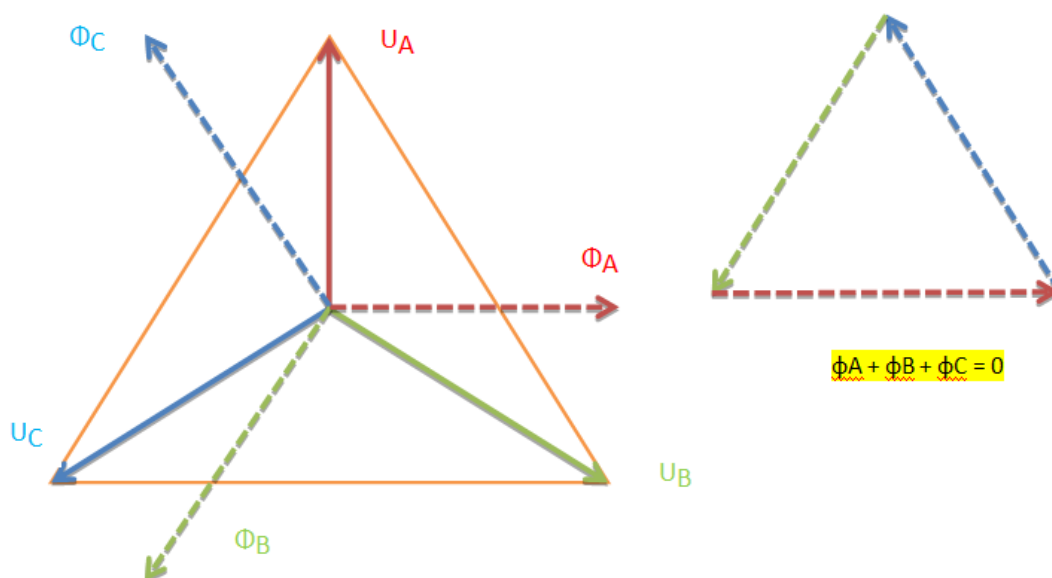
TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR

JÁDRO jako plášťový typ, ale střední sloup stejně široký!!!

složením 3 jader ušetříme společný sloup trojnásobného průřezu (!) – uspořádání v rovině znamená jistou nesymetrii



Složením tří jednofázových jader je společný sloup zbytečný!



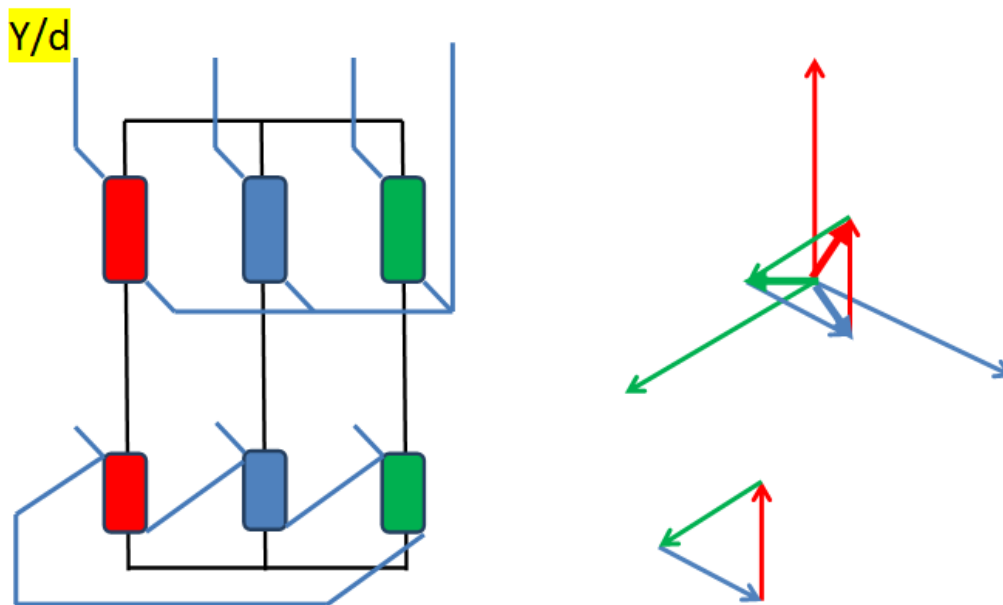
HODINOVÉ UHLÝ:

Pokud spojujeme paralelně jednofázové transformátory (samozřejmě za předpokladu stejného převodu), tak je nutno dbát, aby všechny sekundární napětí byly ve fázi, protože v případě že by byla napětí v protifázi, tak by se sečetly a dvojnásobné U_2 by protlačovalo těmito paralelními obvody obrovský zkratový proud.

		hvězda	Y
			y
		trojúhelník	D
			d
		lomená hvězda	z

U paralelní spolupráce trojfázových transformátorů je situace ještě složitější, pokud se použije stejné spojení na primáru i sekundáru, tak zas mohou být napětí jen ve fázi nebo protifázi, když se ale kombinují různá spojení (z důvodů snižování nesymetrické zátěže) pak nastává i pootočení sekundární soustavy vůči primární a toto pootočení se může měnit v násobcích 30° , jako je dělení ciferníku hodin, podle toho se zavedlo i pojmenování tohoto natočení HODINOVÝM ÚHLEM. Kromě

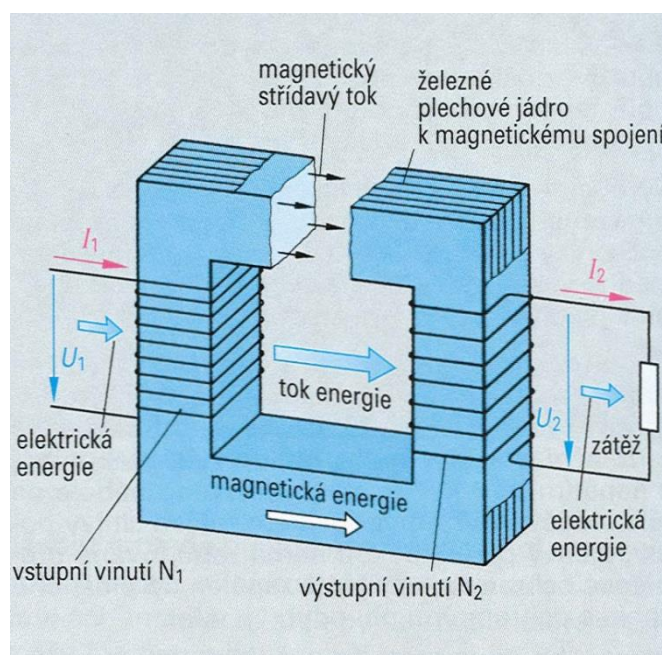
již známých spojení Y a Δ se ještě používá lomená hvězda (Zig-zag) označená Z.
Sekundár má dvě sekce na různých sloupech.

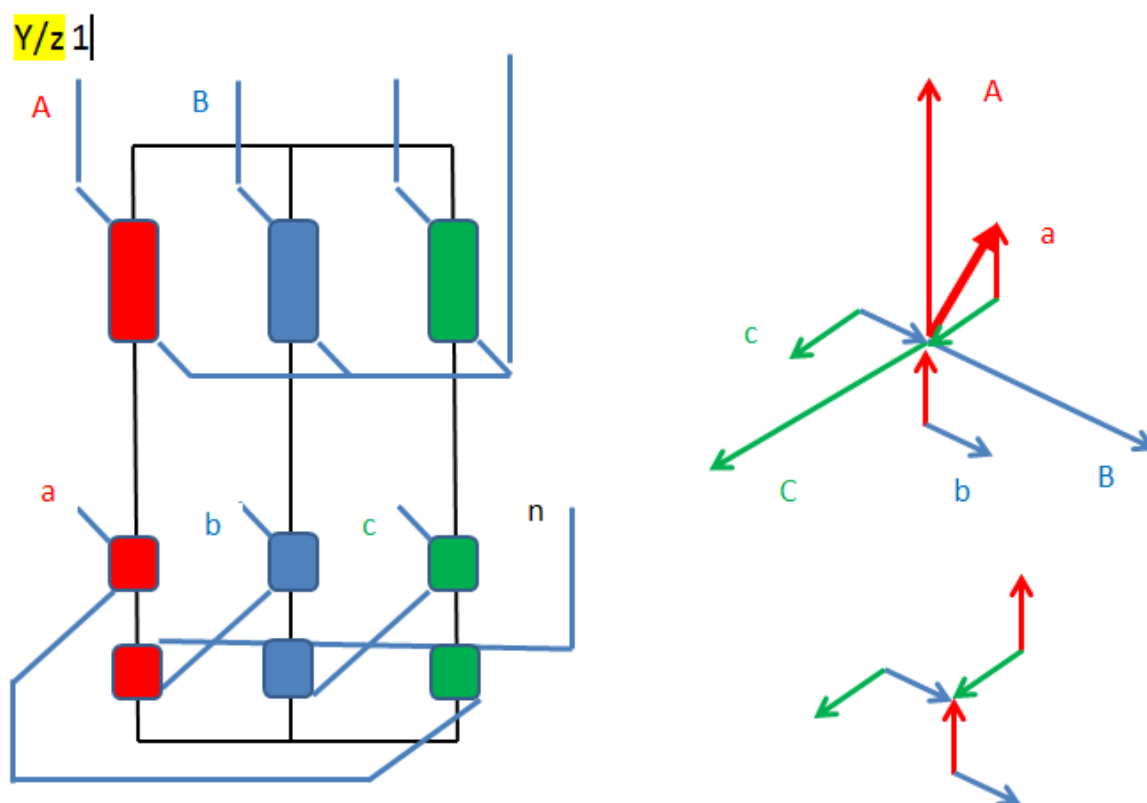


Spojení Y/d 1

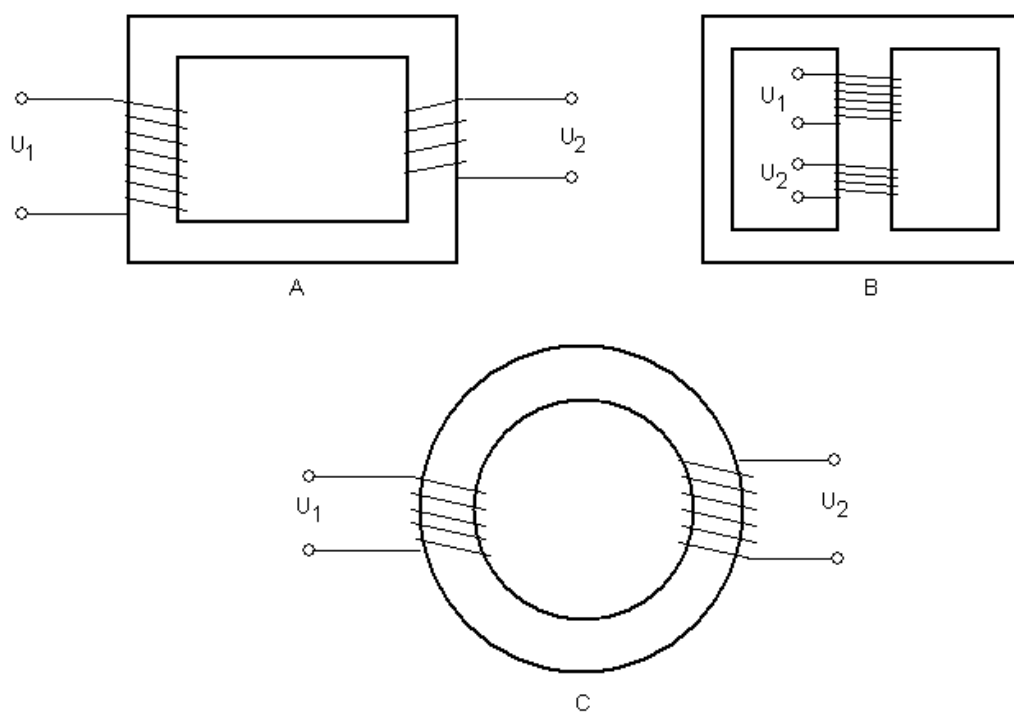
Cívky na stejném sloupu jsou stejně vybarveny, a protože jsou protékány stejným tokem, jejich napětí jsou ve fázi – případně v protifázi, pokud mají opačný smysl točení (Pravá – Levá). Pravotočivá cívka má směr toku totožný se směrem indukovaného napětí.

Ještě poznámka k lomené hvězdě, když se špatně zapojí, to znamená, že se napětí ve fázi nebudou sčítat s posunem 120° , ale jen 60° , tak se jedná o nesmyslné spojení, které dá stejné napětí s dvojnásobným počtem vodičů. Jinak každá sekce sekundáru musí mít více závitů než $\frac{1}{2} N_2$ získané z převodu, odvození nechám na čtenáři...





Spojení Y/z 1



Různá jádra transformátorů

Speciální transformátory

Svářecí transformátor pro bodové svařování má na výstupní straně jeden závit z mědi, chlazený vodou. Velikost proudu se řídí pomocí odboček na primární straně.

Obloukové svařování – k zapálení oblouku se používá asi 40 V – 70 V. K udržení oblouku se používá napětí nižší kolem 20 V – 25 V. Velikost proudu se reguluje oddalováním, vysouváním nebo natáčením magnetického obvodu.

Přístrojové transformátory - Slouží k oddělování elektrických obvodů. Dělí se na měřicí a jistící.

Pecové transformátory - Slouží pro elektrické obloukové nebo indukční (nízkofrekvenční) pece. Výstupní napětí bývá od 4 V - 500 V o výkonu 10 kW - 80 MW.

Chlazení transformátorů

VZDUCHOVÉ

Odvod tepla konvekci (prouděním)

Přirozená nebo nucená konvekce

Menší výkony, větší plocha chlazení – větší objem

OLEJEM – minerálním nebo syntetickým

MINERÁLNÍ

El. oblouk hořlavé plyny + vzduch výbušná směs!

Je hygroskopický (už 0,01% H₂O snižuje EP o 20%)

Kaly zhoršuje se tepelná vodivost

SYNTETICKÉ

- Pro vysoká napětí a velké výkony
- Nehořlavé, nehygroskopické
- Dříve PCB (polychlorované bifenylly) – vysoce toxický!

PLYNEM

Nejčastěji SF₆ (fluorid sírový)

- netečný plyn bez zápachu
- 3x větší tepelná vodivost než vzduch
- lepší elektroizolační vlastnosti

kovová skla

permalloy

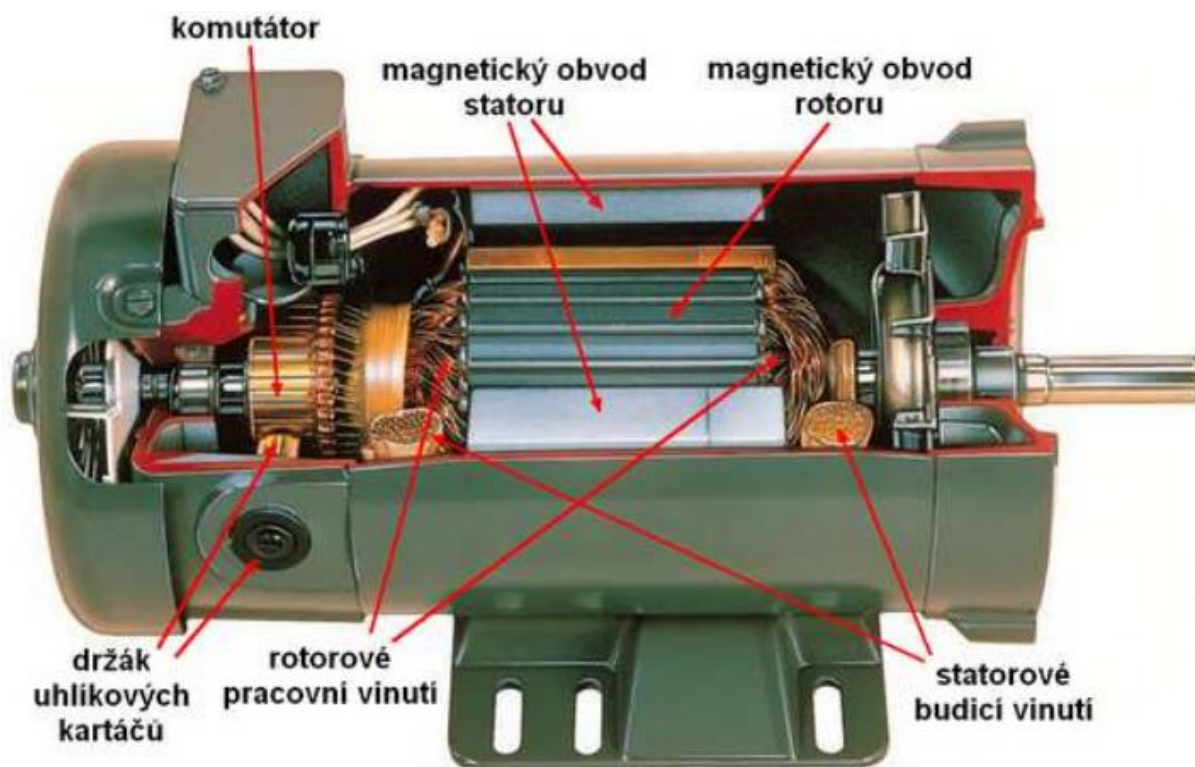
ferit

4. STEJNOSMĚRNÉ STROJE (DC)

Základy (to co si osaháte v laboratoři na rozebraných vzorcích strojů)

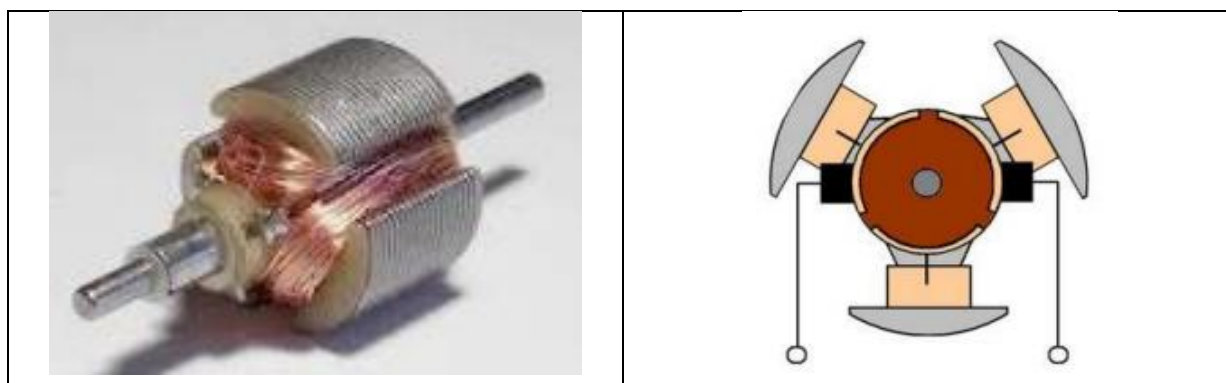
Nejprve celý stroj rozdělíme na stator a rotor.

Stator je ocelová, nebo litinová kostra (vede magnetický tok!) na které jsou zevnitř připevněny budící **póly** v sudém počtu, protože se pravidelně střídají Sever a Jih. Na pólech je **budící vinutí**, které je třeba zapojit podle Ampérova pravidla pravé ruky, všechny cívky jsou protékány stejným proudem. Mezi budícími póly lze často najít i pomocné póly, úzké a opět s vinutím, které probereme později.



Obr. 4-1 Pohled do malého DC stroje

Rotor je složen ze **svazku drážkovaných** dynamových plechů (tloušťka typicky 0,5 mm), v drážkách jsou uloženy cívky kotvy. Krok cívek musí odpovídat počtu pólů na statoru, aby se napětí v jednom závitu sčítalo, kdyby se dala do čtyřpólového statoru dvojpólová kotva, tak by se v závitu kotvy neindukovalo žádné napětí! Vinutí kotvy je do sebe uzavřené, každá cívka začíná na jedné **lameli** a končí na další, kde hned začíná další cívka, **kolik je lamel, tolik je cívek**.



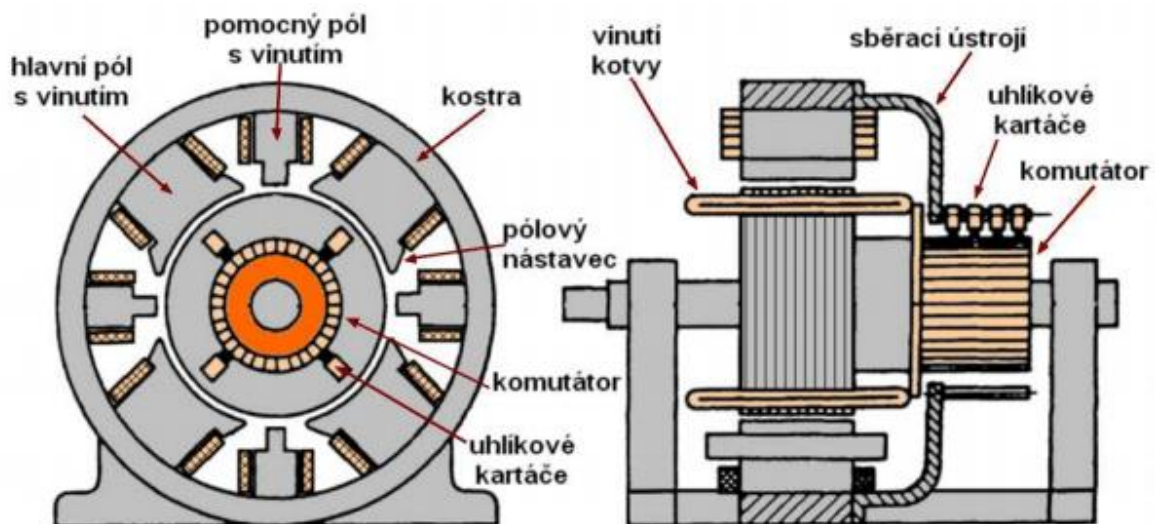
Obr. 4-2 Ilustrace ke vzniku historického názvu KOTVA

Kromě aktivní části cívky v drážce je i neaktivní část v čele, kde se napětí neindukuje, ale odpor má a ztráty v ní vznikají. Cívky se spojují v principu do dvou typů vinutí kotvy:

- Smyčkové cívka mezi sousední lamely, $2a = 2p$,
- Vlnové cívka mezi lamely o dvě pólové rozteče vzdálené, $2a = 2$ paralelní větve

Do 300 až 500 A se přednostně používá vinutí vlnové z důvodů lepší symetrie.

Kluzný kontakt, kterým se odvádí či přivádí proud do kotvy, tvoří kartáč, který klouže po povrchu komutátoru. Počet sad kartáčů po obvodu musí opět odpovídat počtu pólů a zase se pravidelně střídají „+“ a „-“ pokud nejsou všechny pozice obsazeny, tak u čtyřpólu nemůžete mít kartáče proti sobě, protože by byly na stejné polaritě! Mezi sousedními kartáči je celé napětí kotvy a to se rozloží do cívek podle počtu lamel na tomto úseku (třeba u 4 pólového stroje je U_a 4x dokola) aby nedošlo k vytažení oblouku mezi lamelami a následnému shoření komutátoru, nemělo by lamelové napětí přesáhnout 15V, takže pro větší napětí musí být průměr komutátoru velký a lamely úzké... navíc u velkých strojů nesmí být v jednom závitě kotvy napětí větší než 15V. Komutátor funguje jako mechanický usměrňovač.



Obr. 4-3 Příčný a podélný řez (magnetický obvod) 4-pólového DC stroje



Obr. 4-4 Pohled na komutátor s prořezanou mezi lamelovou izolací

Materiál kartáčů je v principu uhlík, ale jeho vlastnosti mechanické i elektrické jsou skutečná „černá magie“ takže výběr vhodných uhlíků vůbec není náhodný. Rovněž najít optimální přitlak a přesnou polohu kartáčů v neutrální poloze k minimálnímu jiskření je náročná operace. Pravidelná údržba

znamená také výměny uhlíků, odprašování vodivého prachu, soustružení povrchu komutátoru a prořezávání mezi-lamelové izolace, což je opět pracné a drahé...

Celý DC stroj je sice nejstarší a nejsnáze pochopitelný, ale je výrobne i provozně (náklady na údržbu a opravy) daleko nejdražší.

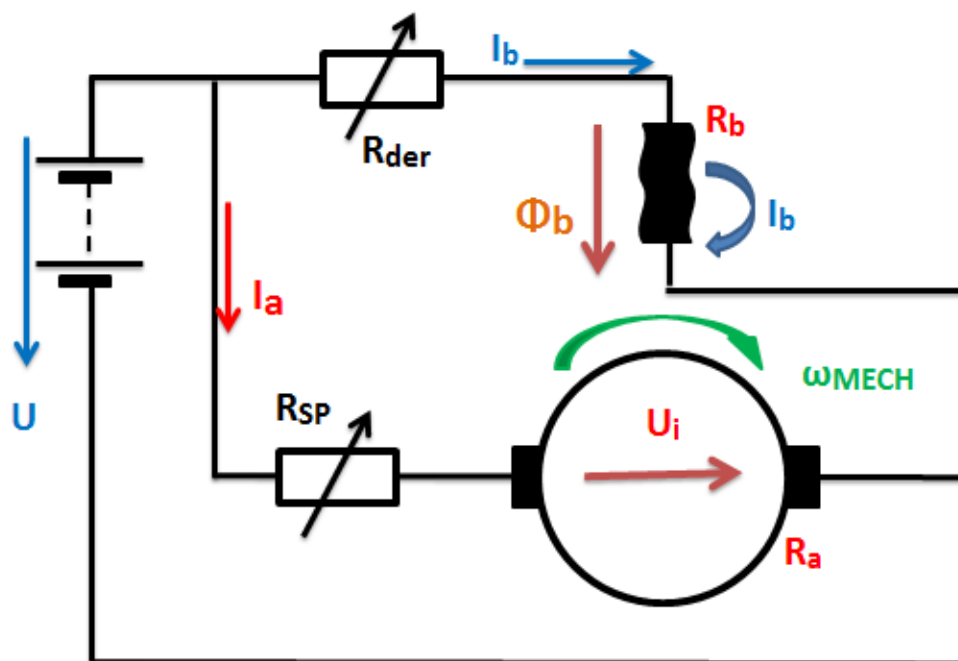
Motor

DC generátor – dynamo je nejstarší známý elektrický stroj a vy již máte za sebou měření na dynamu, ale výklad funkce DC strojů začneme netradičně motorem. Máme **Voltův sloupec** a k němu postupně připojíme **oba elektrické obvody** stroje.

Napřed musíme vytvořit tok, takže zapojíme **buzení**, díky velké indukčnosti má budicí cívka větší časovou konstantu a proud I_b roste pozvolna, až se ustálí na hodnotě:

$$I_b = U / (R_b + R_d)$$

aby byl tok maximální **derivační odpor** R_d vyřadíme a zůstane jen odpor **budicího vinutí** R_b .



Obr. 4-5 DC motor s derivačním buzením

Kdybych připojil kotvu bez spouštěcího odporu R_{sp} , tak by byl **proud omezen** jen odporem vinutí R_a a takovéto připojení lze realizovat jen u nejmenších motorků, kde rozběh trvá velmi krátkou dobu, srovnatelnou s dobou nárůstu proudu v kotvě. U větších strojů máme 2 možnosti:

- Postupně zvyšovat napětí pro obvod kotvy – mít vlastní regulovaný zdroj pro 1 motor,
- Omezit proud spouštěcími odpory, které postupně vyřazujeme (snižujeme) tak jak roste rychlost rotoru.

Co se tedy děje v rotoru při zvyšování rychlosti? A kdy se rozběh zastaví?

Na tyto otázky je jedna společná odpověď. Jak se začínají vodiče kotvy **pohybovat** (v magnetickém poli), tak se v nich indukuje U_i – **protinapětí** (anglicky **BACK EMF** = ELECTRO MOTIVE FORCE) a tím se zmenšuje rozdíl napětí, který určuje výsledný proud obvodem (U na svorkách a U_i indukované ve vinutí, které roste s rychlostí otáčení), když by se tato napětí vyrovnala, obvodem kotvy by netekl

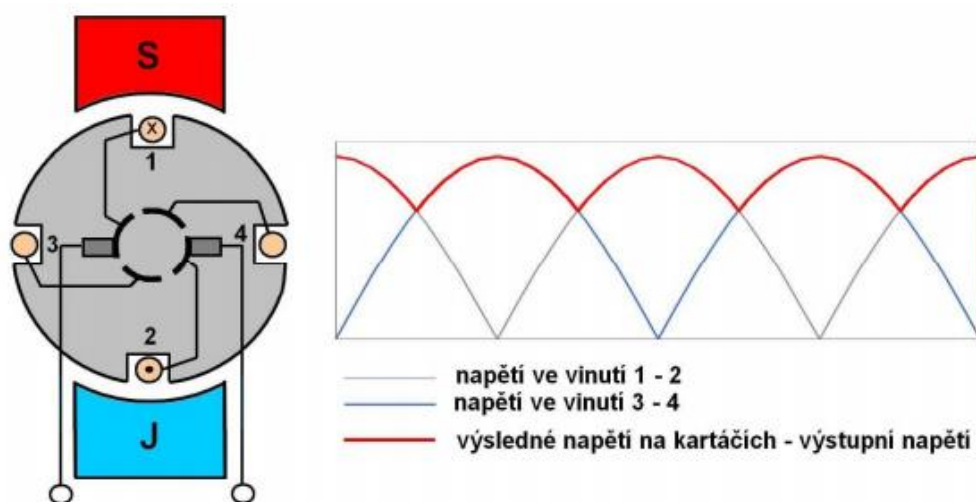
žádný proud, prakticky se zrychlování zastaví při rychlosti o něco nižší, aby kotvou tekla alespoň malý proud a vytvářel se malý krouticí moment k pokrytí mechanických odporů.

Směr otáčení

Pravotočivá cívka vytváří tok ve směru proudu a dále budeme uvažovat všechny cívky pravotočivé. Pro kontrolu si připomeňte AMPÉROVO pravidlo pravé ruky.

Doplníme si vodiče na povrch kotvy v Obr. 4-5 a určíme směr síly na proudovodič v magnetickém poli podle FLEMINGOVA pravidla levé ruky. Tím dostaneme směr otáčení. Jiný postup je že se podíváme a směr toku od buzení a směr toku v kotvě (oba dané směrem proudu) a kotva se bude otáčet tak, aby se magnety seřadily S-J S-J, nebo **mnemotechnicky** **Ui se otočí do směru Φ** .

Stroj se třemi cívkami (a třemi lamelami) se rozběhne z každé polohy, podobně jako tříválec s přesazením pístů na klikové hřídeli o 120° . Zvlnění momentu je poměrně velké a klesá s počtem cívek po obvodu kotvy, podobně jako u víceválcových motorů, stroje na větší napětí musí mít velký počet lamel a tedy i cívek.



Obr. 4-6 Zvlnění napětí za 1 otáčku ze čtyř lamelového komutátoru (dvojitý dvouválec)

Moment stroje

Podle vztahu pro sílu na vodič

$$F = B I l \quad [N, T, A, m]$$

Ize pro všechny vodiče kotvy, které jsou aktuálně v magnetickém poli nakreslit vektory síly, které jsou ve směru tečny. Když sečteme všechny tyto síly, dostaneme nulu, to znamená, není žádná posuvná síla, která by třeba levitovala rotor proti gravitaci, ale další podmínka mechaniky je suma momentů a ty působí všechny v jednom směru (smyslu otáčení). Moment na jeden vodič bude:

$$M_v = \frac{D}{2} B I_v l$$

Zavedeme integrální veličinu Φ (tok jedním pólem) místo lokální B

$$\Phi = B \alpha \frac{\pi D}{2p} l$$

D vnější průměr kotvy (svazku plechů)

I_v proud jedním vodičem kotvy $I_v = I_a / 2a$

- 2a počet paralelních větví
 l aktivní délka vodiče, ve které se indukuje napětí je prakticky shodná s délkou svazku plechů
 α koeficient pólového krytí (cca 2/3 nebo 66%)
 2p počet pólů
 Nv počet všech vodičů kotvy – souvisí s počtem závitů N ($Nv = 2N$)

Pro všechny vodiče, které jsou v magnetickém poli, sečteme momenty do výsledného momentu:

$$M = \alpha 2N M_v$$

Po substituci dostaneme:

$$M = \frac{p}{a} \frac{N}{\pi} \Phi I_a = K \Phi I_a \quad (d1)$$

Kde K je konstanta stroje, daná jeho konstrukcí.

Indukované napětí

Pro indukované napětí v jednom vodiči vyjdeme ze vztahu

$$U_{iv} = B l v \quad [V, T, m, m/s]$$

Vztah mezi obvodovou rychlostí v a úhlovou rychlostí ω je

$$v = \frac{D}{2} \omega$$

Všechny symboly jsou stejné jako pro momentovou rovnici, výsledné indukované napětí počítáme pro jednu paralelní větev, kde je v sérii vodičů:

$$N_v = \alpha \frac{2N}{2p}$$

A substitucí dostaneme:

$$U_i = \frac{p}{a} \frac{N}{\pi} \Phi \omega = K \Phi \omega \quad (d2)$$

Se stejnou konstantou stroje. Pokud studujete starší literaturu, kde se nepracuje důsledně s SI soustavou, a rychlost se uvádí v otáčkách za minutu, pak se konstanta momentová a napěťová liší!

U DC stroje je nejlépe vidět oddělenou funkci budicího proudu, který tvoří magnetický tok a proudu kotvy, který tvoří moment. U AC strojů později uslyšíte o tokotvorné a momentotvorné složce proudu...

Další výhodou v DC strojích je, že zde nemusíme sledovat fázové poměry, jako u strojů střídavých. Bez pochopení této kapitoly, nemá smysl začínat se studiem dalších točivých strojů.

Mechanické charakteristiky

U motorů nás především zajímá rychlost otáčení a jak ji regulovat. Z rovnice (d2) lze vyjádřit rychlost:

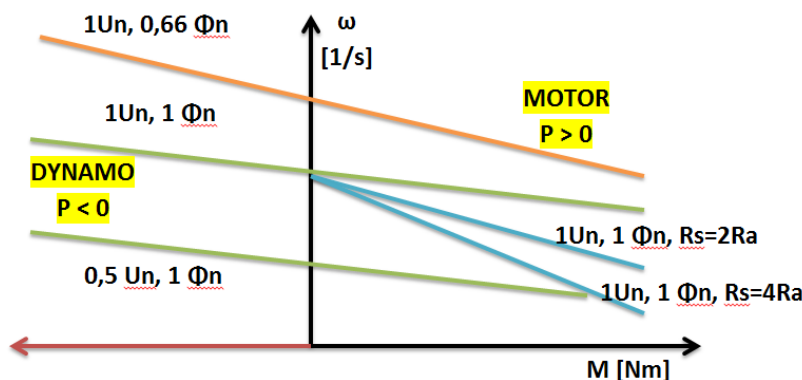
$$\omega = \frac{U_i}{K \Phi} = \frac{U}{K \Phi} - \frac{R_a + R_{sp}}{K \Phi} I_a \quad (d3)$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega$$

Když za U_i se dosadili z obvodu kotvy podle II K.z.

$$U = U_i + (R_a + R_{sp})I_a$$

Z (d3) lze vysledovat i tři způsoby regulace rychlosti DC motoru, především je to regulace napětím, kde ovlivňujeme rychlost naprázdno ω_0 , pak regulace spouštěcím odporem, která je ale ztrátová a výkon $R_{sp} I_a^2$ se promění na teplo, tato regulace změkčuje mechanickou charakteristiku, která se zatížením prudce klesá, no a poslední možnost je regulace magnetického toku změnou budicího proudu.



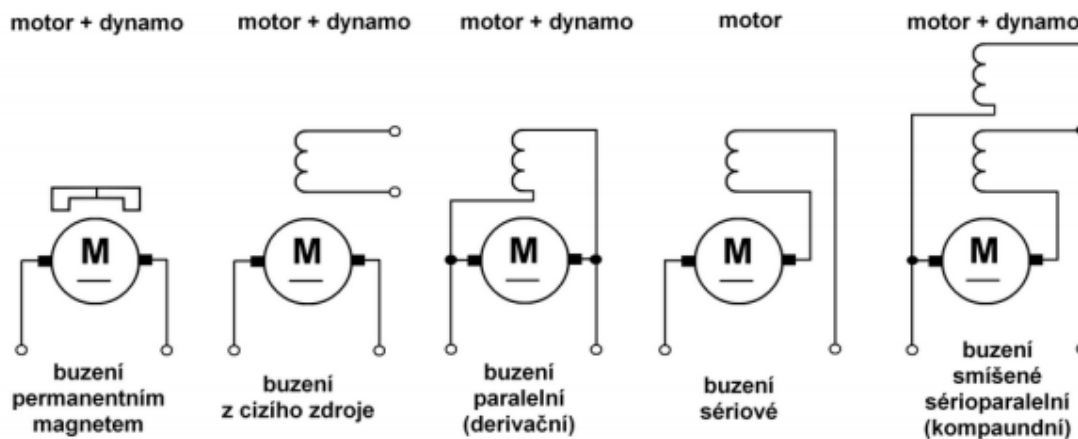
Obr. 4-7 Mechanické charakteristiky podle (d3)

Když se dostaneme nad rychlost naprázdno, tak moment (i proud kotvy) změní znaménko a přecházíme do režimu generátoru, tedy DYNAMO. **Napětí směr nemění!**

Buzení

U DC strojů jsou oba obvody protékány DC proudem, ale nemusí být nutně galvanicky oddělené, zatím jsme se věnovali motoru, který měl paralelně spojený obvod kotvy a buzení, který se častěji nazývá **derivační** buzení i když nemá nic společného s matematickým derivováním, jde o odvedení malé části proudu tak jako derivační kanál na řece odebírá trochu vody pro mlýn. Cizí buzení může mít jiné napětí pro kotvu a jiné pro buzení, sériové buzení má stejný proud oběma vinutími, a aby zůstalo co největší napětí na kotvu, musí na něm být velmi malý úbytek napětí, takže jeho odpor je minimální, to vyplývá i z velkého budicího proudu pro který stačí jen málo závitů **Nb** k vytvoření dostatečného magnetického napětí (příklad je startér spalovacího motoru).

Dělá se i kombinace obou vinutí na každém pólu a pak hovoříme o kompaundaci (kompaundovaném buzení), přehled je na obrázku:

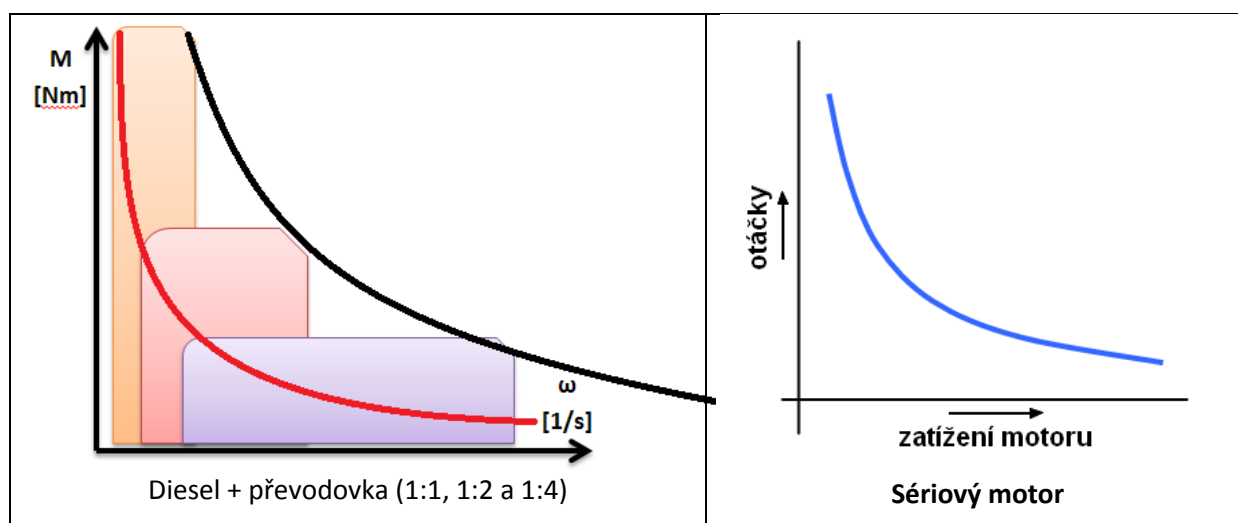


Obr. 4-8 Přehled buzení DC strojů

Sériový MOTOR

U tohoto motoru se velikost toku mění se zátěží, protože podle (d1) s klesajícím momentem klesá I_a a ten zde teče i budicí cívku, takže bez zátěže by teoreticky mělo být nulové buzení a podle (d3) nekonečná rychlost při chodu naprázdno. Víme již z laboratoří, že existuje nějaký zbytkový (remanentní) magnetismus, ale pokud je třeba 10%, pak podle (d3) bude při odlehčení (mechanickém) rychlost 10krát vyšší a když se rotor místo 3 000/min roztočí na 30 000/min, tak ho odstředivá síla zničí a havárie ohrozí okolí kinetickou energií! Tam kde může dojít k odlehčení – třeba prokluzem kol nebo řemenů – se musí použít rychlá regulace.

Výhoda sériového motoru je v jeho mechanické charakteristice pro trakční účely (lokomotivy, tramvaje), srovnajme spalovací motor s vícešupňovou převodovkou, která má stejnou charakteristiku:

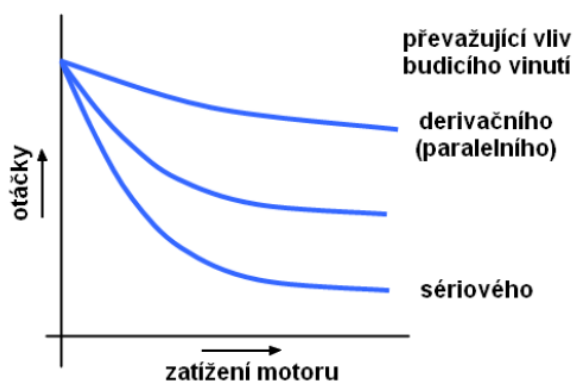


Obr. 4-9 Sériový motor nepotřebuje vícešupňovou převodovku pro trakci

Regulace napětím a spouštěcím odporem je stejná jako u motoru derivačního, **odbuzování** se řeší snížením proudu do budicí cívky odbočením části proudu do paralelního bočníku (shuntu) a odtud slangový výraz pro odbuzování tzv. ŠUNTOVÁNÍM.

Kompaundní MOTOR

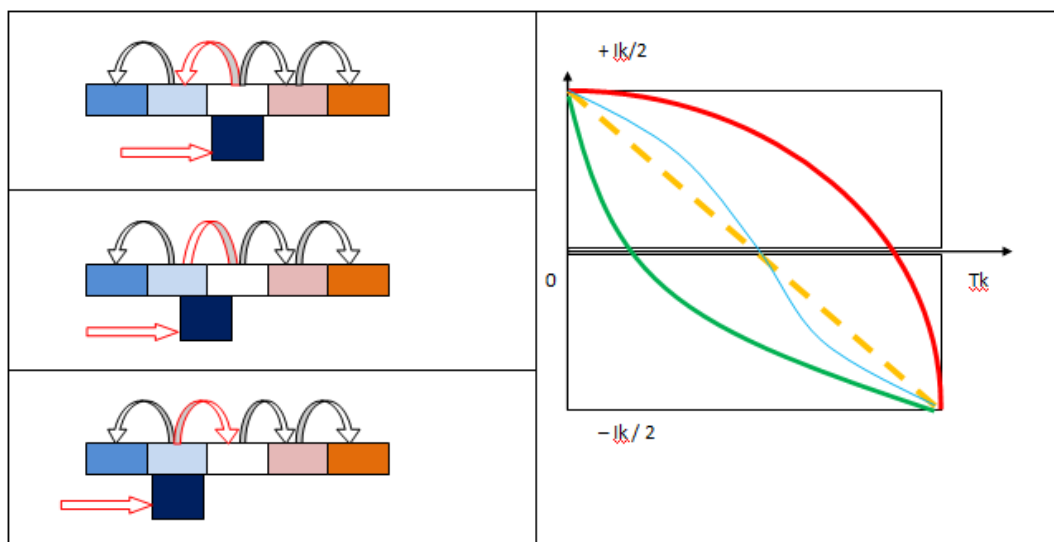
Přítomností derivačního vinutí omezíme rychlost při odlehčení, kdy zůstává trvale tok od derivačního buzení, poměrem toků regulujeme stabilitu rychlosti.



Obr. 4-10 MECHANICKÉ charakteristiky kompaundního motoru pro různé poměry toků

Pomocné póly – Komutační

Nejprve se podívejme na proces komutace, který probíhá neustále během otáčení kotvy a nejlépe ho ilustrují 3 obrázky, na kterých sledujeme průběh proudu jednou cívkou kotvy. Červená cívka je protékána proudem $0,5 I_k$ (polovičním proudem kartáče), pak je ve zkratu a po odzkratování v ní teče proud stejné velikosti opačného směru:

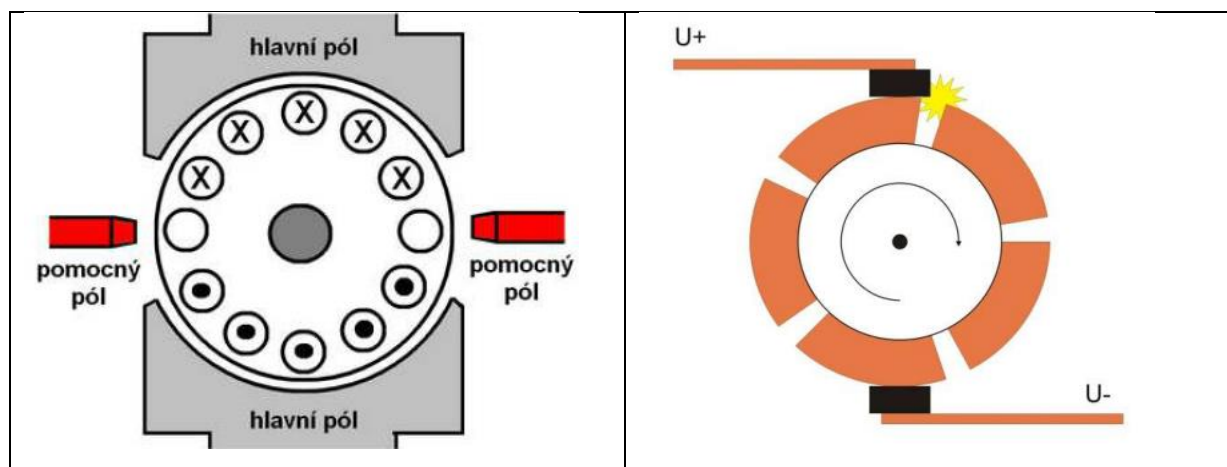


Obr. 4-11 Komutace jedné cívky kotvy

Tedy za dobu zkratu musí dojít k pokud možno plynulé změně proudu, čemu ale indukčnost cívky brání a tak je zánik proudu napřed pomalý, aby na konci doby komutace byla časová změna proudu velmi rychlá (červená čára) a tím vzniká na cívkě napětí:

$$u_R(t) = L \frac{di}{dt} \quad (d5)$$

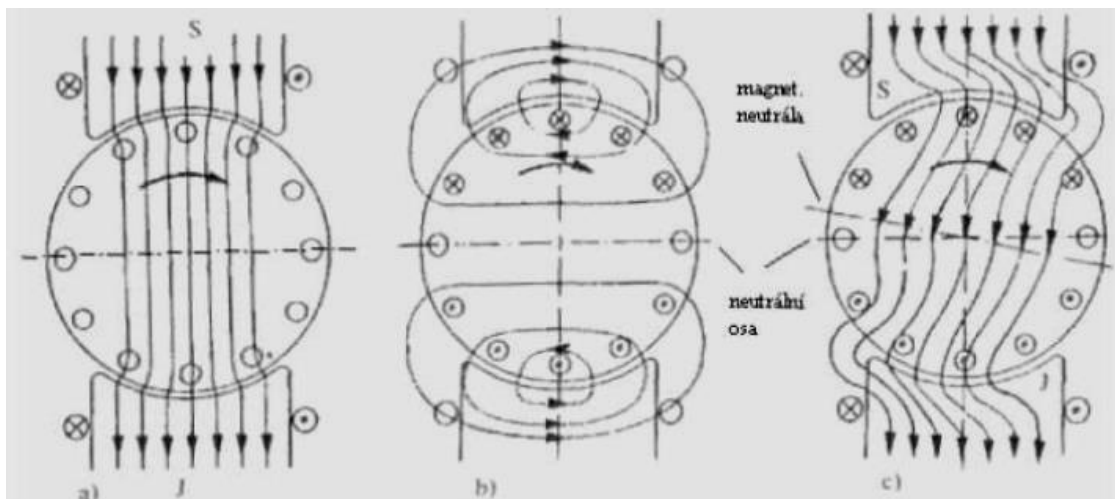
které vyvolá jiskření na odbíhající hraně kartáče. K urychlení proudu je třeba do komutující cívky naindukovat napětí (zas pohybem v magnetickém poli a toto pole má zasahovat jen jednu (práve komutující) cívku. To jsou ty úzké pomocné póly mezi budícími! Napětí musí být proměnné podle velikosti proudu v kotvě, proto závity cívky na komutačním pólu budou protékány proudem kotvy.



Příliš silné pole pomocného pólu může vést k „překomutování“, kdy naopak je nejrychlejší změna proudu na začátku doby komutace (zelená čára) a kartáč jiskří na náběžné hraně. Ideální je přímková komutace podle modré čáry.

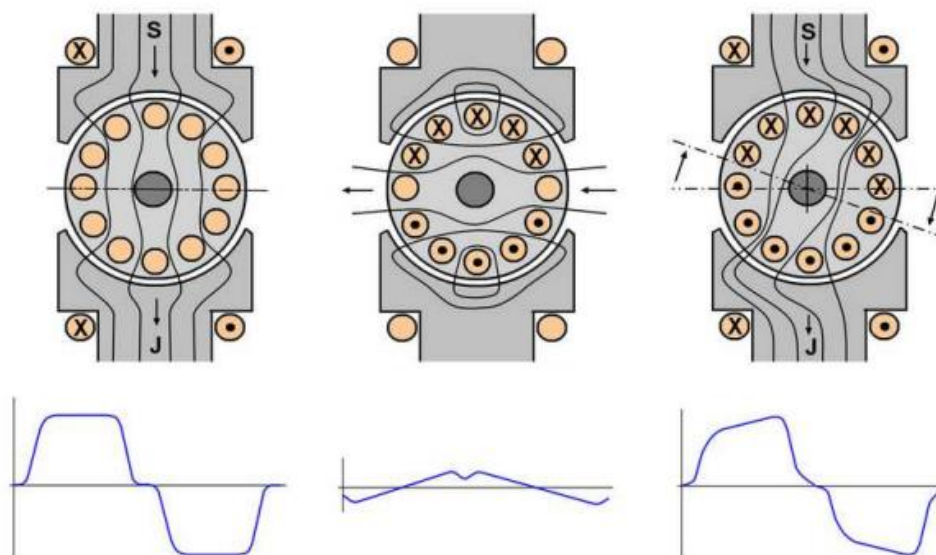
Reakce kotvy

Že cívka na pólu vytváří magnetické pole, je už jasné, v tomto poli se pohybují vodiče kotvy a v nich se indukuje napětí. Jakmile ale začne téct proud obvodem kotvy, tak toto vinutí rovněž vytváří pole. Na obrázku je vidět jak vypadají jednotlivá pole samostatně a jaké vznikne pole výsledné.



Obr. 4-12 Průběhy magnetických polí a) magnetické pole statoru **nezatíženého** motoru, b) magnetické pole **reakce kotvy** = rotoru, c) magnetické pole **zatíženého** motoru

Je zjevné, že deformací původního souměrného pole se posune magnetická neutrála, takže by se měly posouvat i kartáče, aby komutovali cívku, která je v nulovém poli! Pole reakce kotvy má sice menší amplitudu, viz Obr. 4-13,.

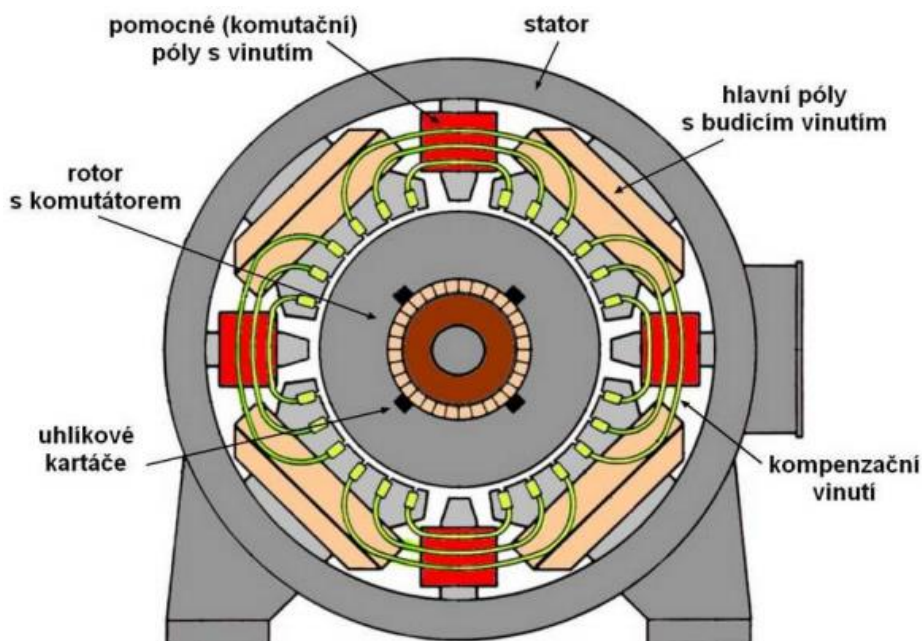


Obr. 4-13 Průběhy rozložení magnetického pole po obvodu kotvy

ale když se pracuje při regulaci motoru s velkým odbuzením, mohlo by pole reakce kotvy převýšit buzení.

Kompenzační vinutí

K potlačení reakce se do statoru umístí závity dalšího vinutí, které bude protékáno proudem kotvy a bude vytvářet stejný tok jako kotva, ale opačného směru. Na Obr.4-14 je vidět uložení kompenzačního vinutí do drážek v pólových nástavcích, směr proudu kotvy pod pólem a proudu v drážkách pólového nástavce musí být opačný!

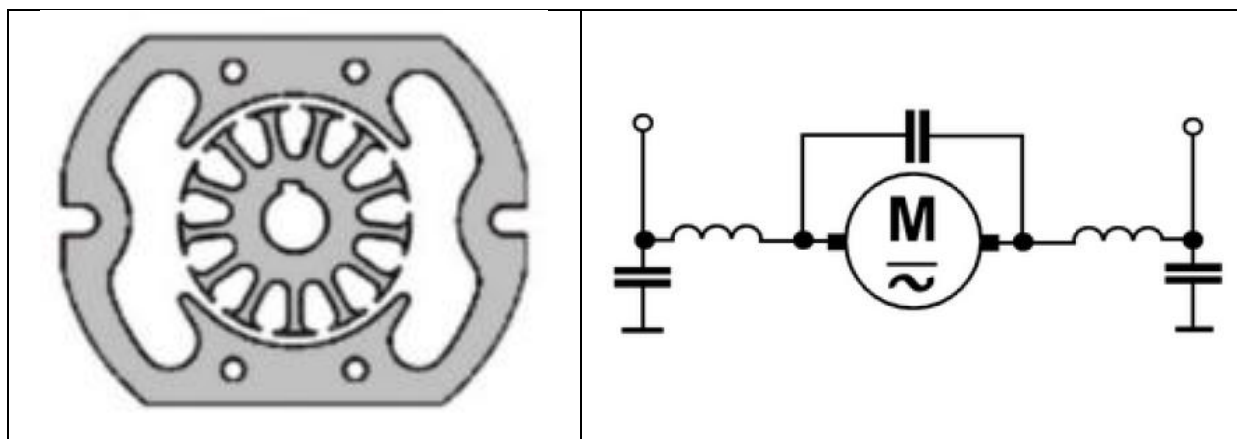


Obr. 4-14 Kompenzační vinutí ve statoru 4-pólového stroje

Univerzální MOTOR

Jednofázový sériový UNIVERZÁLNÍ komutátorový motor

Pro ruční nářadí, kdy vyžadujeme velký výkon a malou hmotnost je ideální komutátorový motor univerzální, který se liší od DC motoru se sériovým buzením jen tím, že má listovaný i stator. Může být napájen jak DC tak AC proudem, nelze použít derivační buzení, protože velká indukčnost budicí cívky by způsobila velký fázový posun mezi budicím proudem a proudem kotvy. Malý objem kotvy dá vždy malý moment, podobně jako objem válce u spalovacího motoru, výkon se dožene rychlostí, podle známého vztahu $P = M \cdot \omega$. Řez magnetickým obvodem a schéma zapojení jsou na obrázku:



Obr. 4-15 UNIVERZÁLNÍ MOTOR, plechy statoru a rotoru a schéma zapojení

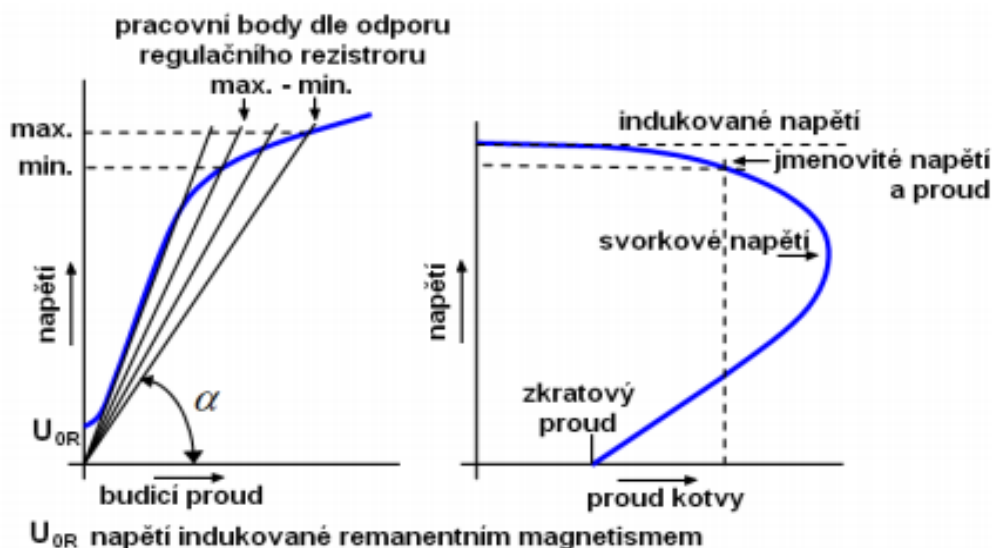
Těmito motory je vybaveno 95 % všech kuchyňských strojů, vysavačů a jiného ručního nářadí pro dílnu a zahradu. DC napájení mírně zlepší výkon, problém je zas s vypínáním DC proudu (oblouk). Filtrační kondenzátory brání elektromagnetickému rušení. Na rozdíl od velkých strojů se zde nepředpokládají opravy a při poruše se mění celý motor.

Dynama

Dynamo s cizím buzením se dostatečně probralo v laboratoři, kde jste se seznámili jak s konstrukcí, také jste naměřili jeho charakteristiky.

Derivační dynamo

Dynamo s vlastním buzením (DERIVAČNÍ) se liší ve dvou zásadních bodech, první je jeho rozběh a druhý pokles napětí na výstupních svorkách při zatěžování, protože z tohoto pokleslého napětí se napájí budící vinutí a tedy se zatěžováním dynama dochází k jeho automatickému odbuzování – tím je toto dynamo tzv. zkratu vzdorné a po překročení nominálního proudu se V-A charakteristika rychle zřítí do $I_k \ll I_n$.



Obr. 4-16 Samonabuzení a zkratuvzdornost Derivačního dynama

Ještě zpět k problému rozběhu dynama, kdy není k dispozici žádný zdroj napětí, takže jsme odkázáni na malé remanentní napětí, které jste pozorovali u dynama s cizím buzením. Z tohoto napětí se začne protlačovat malý budící proud, který má zesílit tok, pokud se nesprávně zapojí okruh buzení ke kotvě a dojde naopak k zeslabení, tak následek je tzv. SAMOVRAŽDA – tok klesne na nulu a k oživení takového dynama musíte přinést vnější zdroj, stačí třeba mžikové připojení 12V.

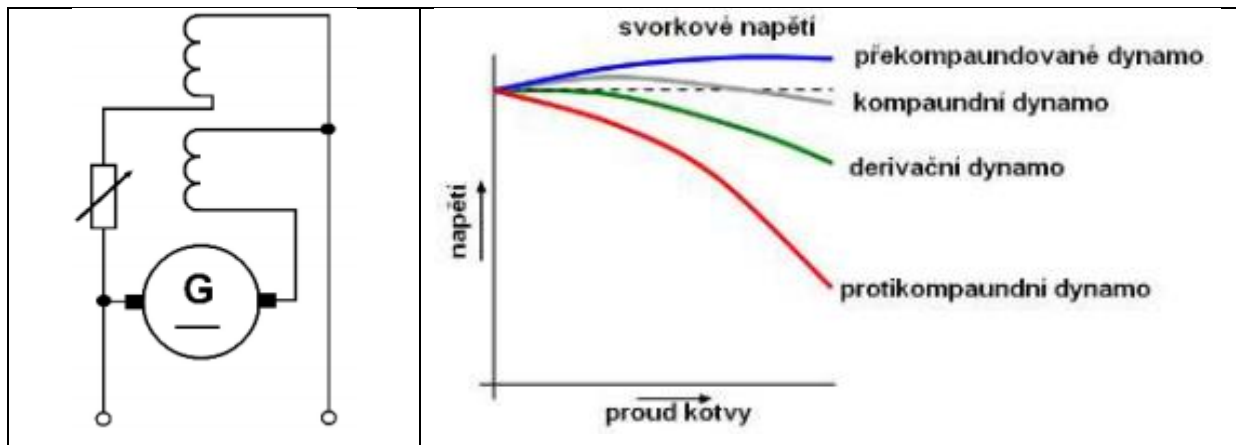
Když se změní směr otáčení, tak se změní i směr U_i v kotvě a pokud se současně nepřepóluje připojené buzení, zase dojde k SAMOVRAŽDĚ, u starých železničních dynam, které fungovaly v obou směrech jízdy se místo přepólování buzení přetočilo o jednu pólovou rozteč celé sběrné ústrojí a tím se zachovala polarita pro oba směry otáčení. Do krajních poloh k zarážkám kartáče unášelo tření o komutátor.

Podívejme se ještě na proces správného SAMONABUZENÍ, který můžete pozorovat na obrázku nahoře. Jde o grafické řešení obvodu s nelinearitou, kdy jsou paralelně zapojeny dvě větve – buzení s lineárními odpory R_b a R_d a kotva u které stačí brát v úvahu charakteristiku naprázdno $U(I_b)$. Až do kritické hodnoty R_d se průsečík pohybuje pod dolním kolenem, pak dojde k náhlému skoku...

Kompaundní dynamo

Doplněním sériového buzení k derivačnímu lze ovlivnit výslednou vnější charakteristiku zdroje, jak je na následném obrázku, tok sériové cívky se může sčítat nebo odečítat od toku cívky derivační.

Správně navržené kompaundní dynamo může dodávat konstantní napětí bez regulace.

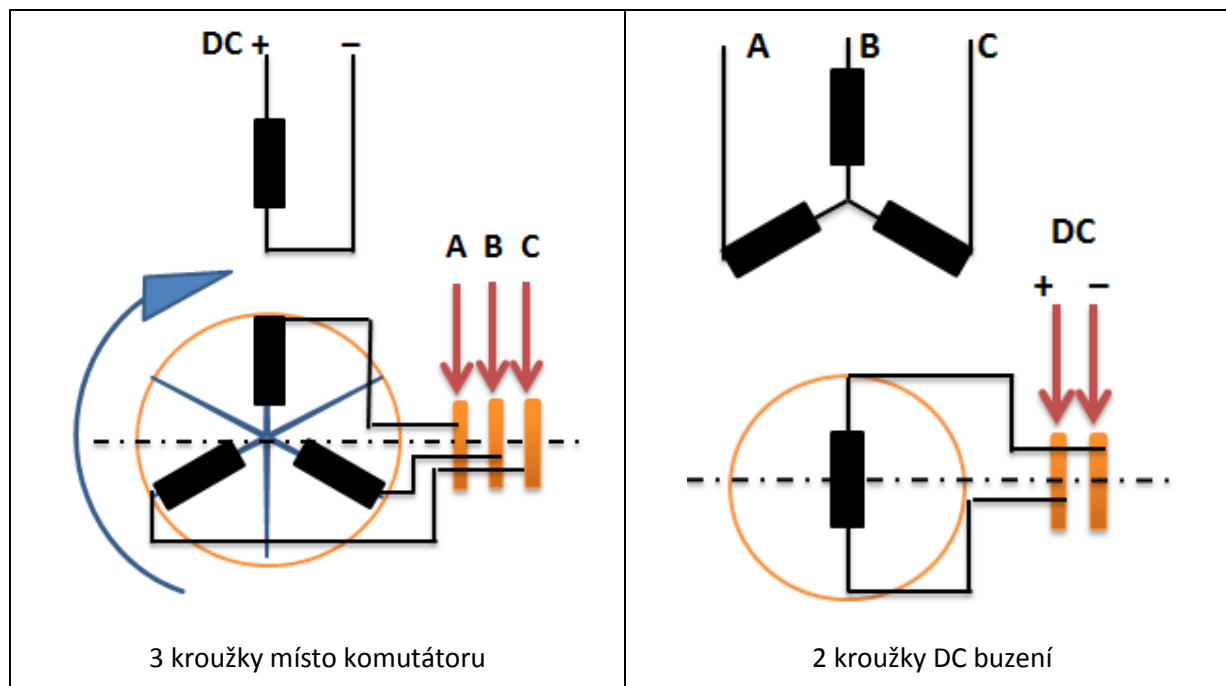


Obr. 4-17 Kompaundní dynamo

5. Synchronní generátor

Vyjďeme ze znalostí DYNAMA ...

Jak bylo zmíněno v kapitole 1 je synchronní generátor SG v elektrárnách základním zdrojem EE. Nejjednodušší cesta k SG je vyjmout z DYNAMA kotvu s komutátorem a nahradit ji kotvou se třemi kroužky – kluznými kontakty na vyvedení 3 fází. Všechny cívky v kotvě se rovnoměrně rozdělí do tří fází, tak aby napětí, které se v nich indukují, byly vzájemně vždy o 120° posunuty. Jednofázové SG probírat nebudeme, mají svá specifika a problémy...



Obr. 5-1 Střídavá kotva do statoru dynama a inverze konstrukce s buzením do rotoru

Spojení vinutí kotvy může být jak v trojúhelníku, tak ve hvězdě, vyvedení středu by ale vyžadovalo čtvrtý kroužek.

Takovéto uspořádání se používá jen u nejmenších výkonů, protože pro větší výkony jsou problémy i s napětím mezi kroužky i s průřezem kartáčů. Výhodnější je inverze uspořádání, kdy budící póly dáme na rotor a trojfázové vinutí umístíme na statoru. Pak stačí pro napájení buzení jen 2 kroužky (+ a -) a jak víme z předešlé kapitoly, budící příkon je jen v jednotkách procent výkonu stroje.

Příklad třeba SG 200MW potřebuje buzení $1\text{MW} = 660\text{V} \times 1500\text{A}$, které napájí budič – dynamo poháněný spolu s SG parní turbínou. V takovém proudu nelze úspěšně regulovat, takže posuneme regulaci do buzení budiče, který bude třeba $20\text{kW} = 400\text{V} \times 50\text{A}$. pokud ten provedeme jak derivační dynamo, tak do buzení odvedeme třeba 5A a ty už lze regulovat běžným odporem. ☺

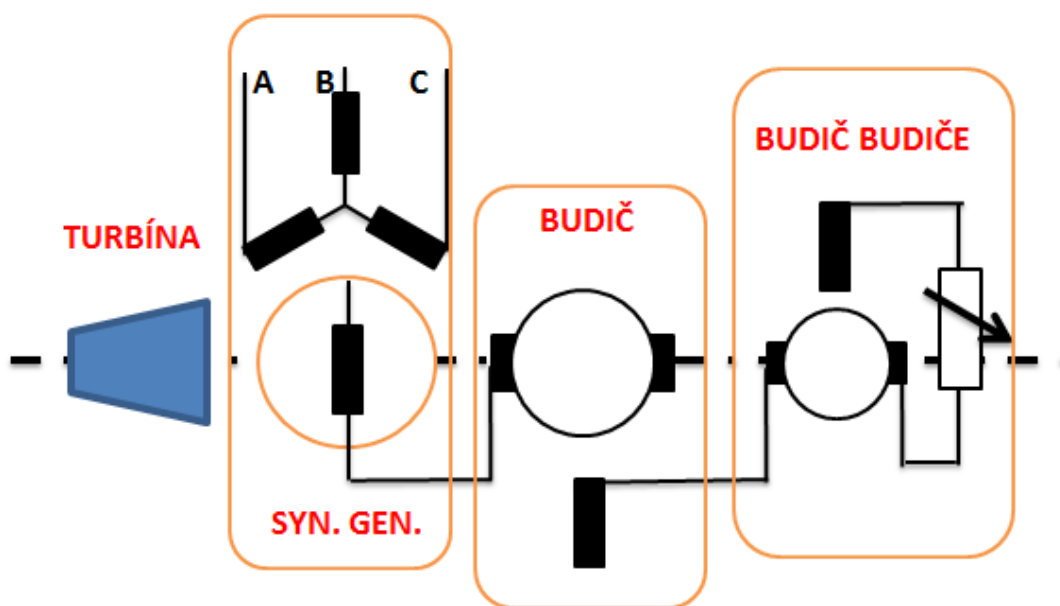
Na obrázku je schéma propojeno jen jednoduše, zkuste si další vodiče pro kontrolu správného pochopení doplnit sami. Vinutí kotvy na statoru umožní jednoduché vyvedení středu vinutí (pokud je spojení Y) a tím i sítě TN, kde jsou dostupná jak fázová tak sdružená napětí.

Bezkartáčové buzení

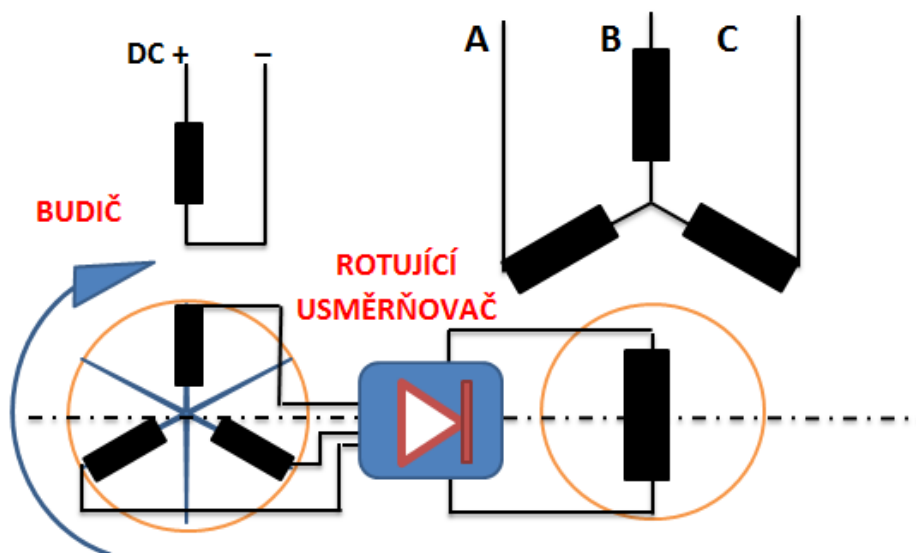
Na dalším obrázku je realizace bezkartáčového buzení kdy budič je rovněž SG, ale s buzením na statoru, kde se provádí i regulace, oba stroje musí mít společný hřídel a na něm pevně uchycený **diodový rotující usměrňovač** (šesti pulzní můstek), který napájí buzení SG. Odpadají jak kartáče na kroužcích SG, tak na komutátoru BUDIČE, takovéto provedení buzení se používalo na polních zdrojích pro ČSLA už koncem let 196x.

Automobilní alternátor

Již při představování automobilního dynama jsme uváděli, že od konce šedesátých let bylo nahrazeno alternátorem, který má dosud stále stejnou koncepci mnohapólového rotoru s centrální budicí cívkou a trojfázového vinutí statoru, které je přímo ve stroji spojeno s diodovým můstkem, tak že ze stroje už vystupuje DC proud jedinou svorkou. Jak jsme si ukazovali už u STARTÉRU je specifikum auto elektriky jednopólový rozvod, kde zpětný vodič tvoří kovová kostra karosérie. Protože alternátor pracuje v širokém rozsahu rychlostí, musí být k udržení konstantního napětí regulován i jeho tok (budicí proud) a dnes je již většinou polovodičový regulátor rovněž integrován uvnitř alternátoru.



Obr. 5-2 Kaskáda buzení velkého SG s DYNAMEM a budičem BUDIČE



Obr. 5-3 bezkartáčové buzení s rotujícím usměrňovačem na EC

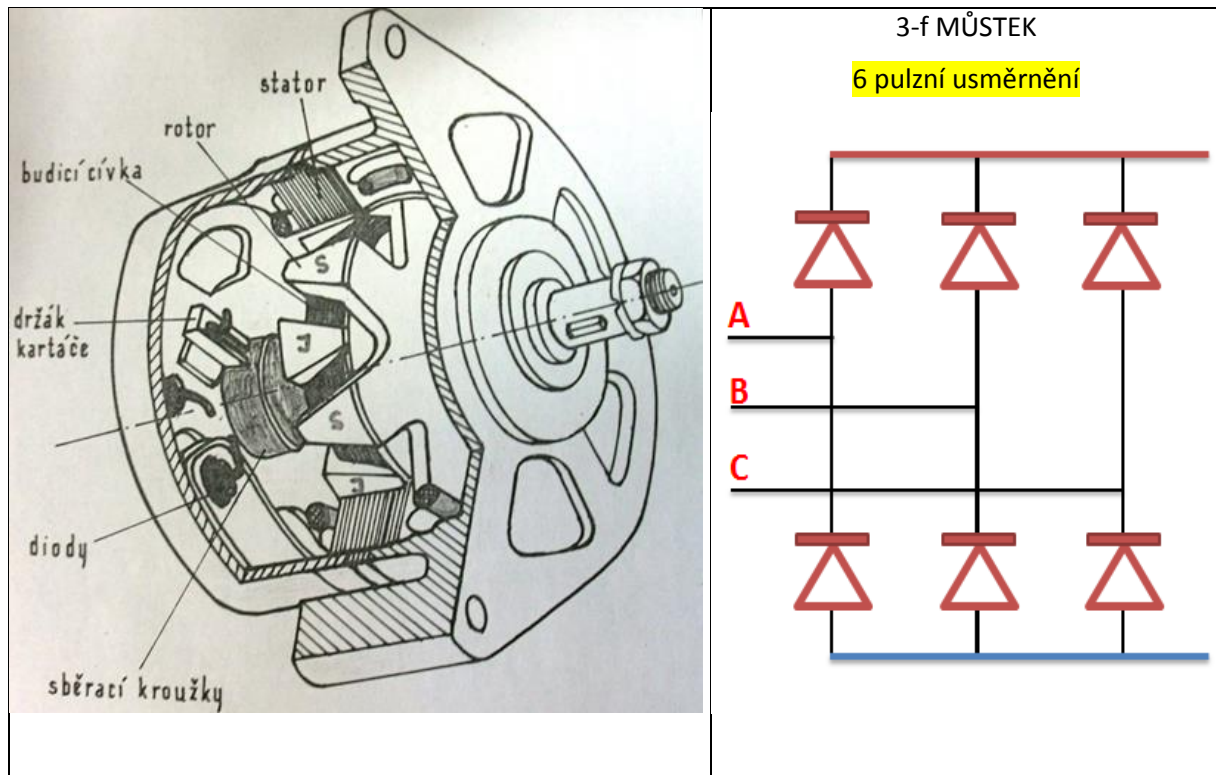
Rychlost otáčení rotoru určuje frekvenci, takže pro $f = 50\text{Hz}$ se dvojpólový rotor musí otočit 50x za sekundu, čtyřpólový udělá za jedno otočení dvě vlnky napětí, takže se otočí jen 25x... atd.

$$n1 = 60 f / p$$

(g1)

Pro evropskou frekvenci $f = 50\text{Hz}$:

2p=	2	4	6	8	10
n1 (1/min)	3000	1500	1000	750	600



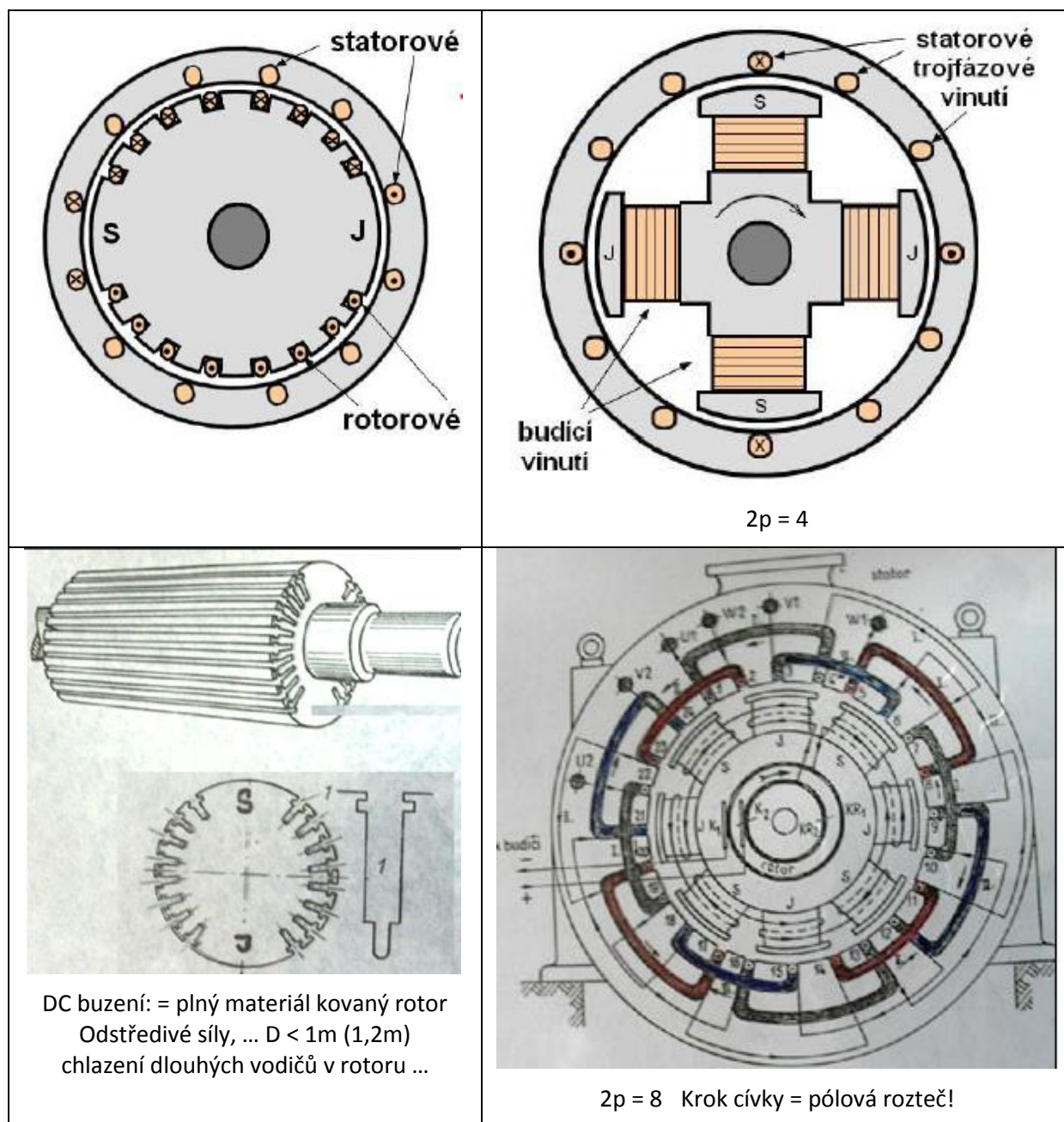
Obr. 5-4 Automobilní alternátor s dráповým rotorem a vestavěným usměrňovačem

TURBO a HYDRO

V tepelných elektrárnách parní turbíny dávají rychlost 3000/min takže SG musí být dvojpólový, rotor se dělá hladký, průměr je kolem 1m z důvodu odstředivého namáhání a tyto SG se nazývají **TURBOSTROJE**, pro vodní elektrárny s malými spády se používá Kaplanova turbína s několika sty otáček za minutu, tam musí být použit SG s velkým počtem pólů, co vede na velký průměr (a krátkou délku, většinou ve svislém směru), takže deštníkový tvar a mnohapólový SG se nazývá **HYDROSTROJ**.

NEJVĚTŠÍ turbo stroje se dělají dnes až do výkonů 1000MW – třeba JE Temelín, mimochodem vyroben ještě v ČSSR ve Škodě Plzeň, která na jeho výrobu musela postavit novou halu, a pak se vyrobily jen tři kusy – prototyp a dva bloky JETE. Ostatní projekty JE ve východní Evropě se již nerealizovaly!

Největší problém těchto velkých strojů je ve chlazení a i když se dosahuje účinnosti vysoce přes 99% tak jedno procento ztrát zde představuje 10 000kW, čímž byste mohli vytápět v zimě dva tisíce bytů, ale zde to musíte odvést z jediného stroje. Do 100MW se ještě dalo chladit vzduchem, pak se chladilo **vodíkem** s rizikem výbušné atmosféry a dnes se největší stroje chladí **přímo vodou** do jednotlivých vodičů. Mechanická pevnost hřídelů, či celých rotorů je rovněž na hranici. **Supravodivé buzení** SG jsou stále jen v oblasti výzkumu a vývoje.



Obr. 5-5 Hladký rotor a rotor s vyniklými póly (oba s budícím vinutím)

Vlastnosti SG budou podobné jako u DYNAMA, ale musíme aplikovat vše, co jsme se dověděli u TRAFA, jelikož ve střídavých obvodech se kromě odporu vinutí uplatní i (rozptylová) reaktance.

Pro indukované napětí můžeme psát stejný vztah jako byl odvozen pro transformátor s tím, že cívky rozloženého vinutí nemusí zabírat vždy s celým tokem a tak zavádíme koeficient vinutí k_v .

$$U_i = 4,44 f \Phi N_1 k_{v1} \quad (g2)$$

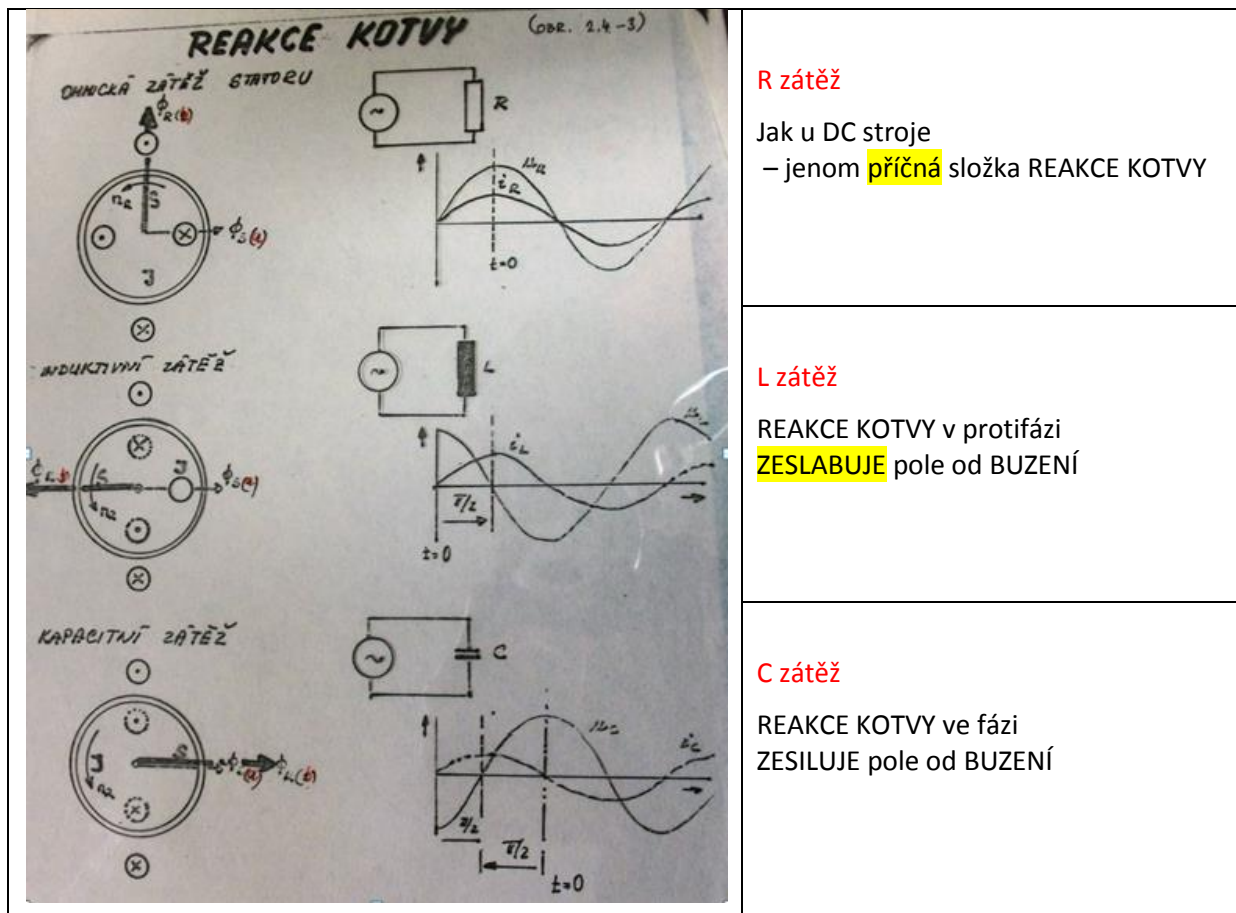
Kromě vnitřní impedance SG musím respektovat i charakter zátěže, který způsobuje fázový posun mezi napětím a proudem, což u DYNAMA nebylo. Tam neexistoval žádný jalový výkon, účinník atd.

Magnetizační charakteristika. Neboli naprázdno je stejná jako u dynama.

Zatěžovacích charakteristik už bude více podle účinku zátěže, než se k nim propracujeme, prozkoumáme vliv reakce kotvy.

Reakce kotvy

U DC strojů je rozdělení vodičů podle směru proudu po obvodu kotvy dáno polohou kartáčů, střídavá kotva takovou jasnou polohu nemá, je samozřejmé, že napětí se indukuje ve vodičích v magnetickém poli, tj. těch, které jsou právě pod pólem, ale jen s odporovou zátěží je maximum proudu tam, kde je maximum napětí, s induktivní zátěží proud zaostává a s kapacitní předbíhá, jak to vplývá na směr toku, který produkuje vinutí kotvy a jeho vztah s budícím vinutím ilustruje obrázek:



Obr. 5-6 Vliv účinku zátěže na reakci kotvy SG

Viděli jsme tři krajní případy a mezi nimi lze najít spojitou oblast, každopádně lze reakci rozdělit na tu od činné složky proudu, která dělá pole příčné a od jalové složky, která působí ve směru budícího toku – buď souhlasně, nebo nesouhlasně.

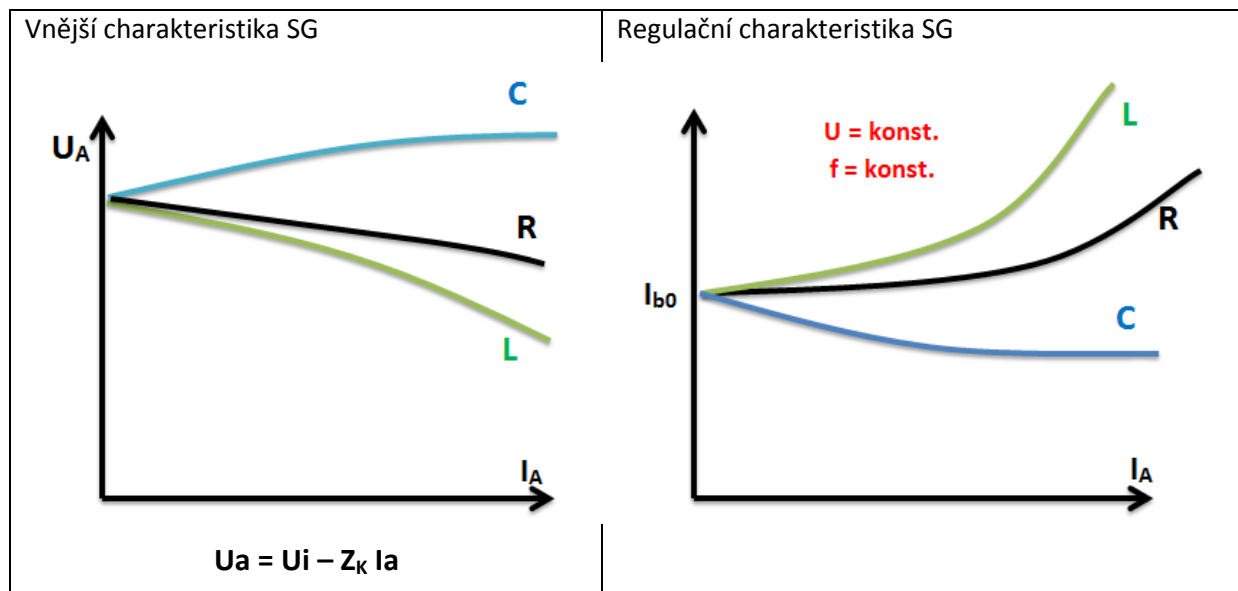
Poznámka: pro hladký rotor je tok reakce kotvy větší než pro vyniklé póly, protože vzduchová mezera, která představuje magnetický odpor je všude stejná.

Sólo SG

V dalším budeme rozlišovat samostatně fungující SG s malou sítí a generátor který pracuje do velké sítě spolu mnoha dalšími generátory – třeba v celé Evropě... napřed teda ten samostatný generátor.

Zatěžovací charakteristika, která se měří pro **konstantní budící proud**, klesá s odporovou zátěží **podobně jako u dynama**, ale je třeba si uvědomit, že úbytek napětí na svorkách je nejen na odporu

vinutí kotvy, ale i na rozptylové reaktanci, která byla zavedena a vysvětlena v kapitole 3. Když stejný proud budeme odebírat do kapacitní zátěže, tak jednak poroste vnitřní napětí, díky „přibuzení“ od reakce kotvy a pak také se pootočí „úbytkový trojúhelník“ který zase známe z teorie transformátoru, takže se zátěží výstupní napětí paradoxně stoupá!

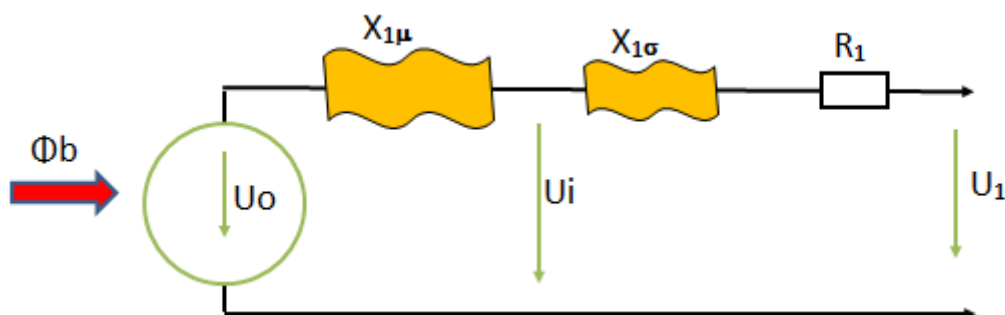


Obr. 5-7 Charakteristiky pro sólo SG

Pro regulační charakteristiku, kdy máme udržet **konstantní svorkové napětí**, pak musíme pro **kapacitní** zátěž odbuzovat, a nejvíce přibuzovat musíme pro zátěž induktivní, která nejvíce působí proti toku od buzení. Samozřejmě jako u dynama musíme rovněž kompenzovat úbytek na vnitřní impedanci vinutí kotvy.

Náhradní schéma a fázorový diagram

Zase budeme dělat pro jednu fázi a na základě znalostí z TRAFa můžeme nakreslit pro jednu fázi kotvy náhradní schéma, které postihuje tok z budícího vinutí samostatným zdrojem U_0 , indukčnost reaktance $X_{1\mu}$ vytváří tok reakce kotvy.

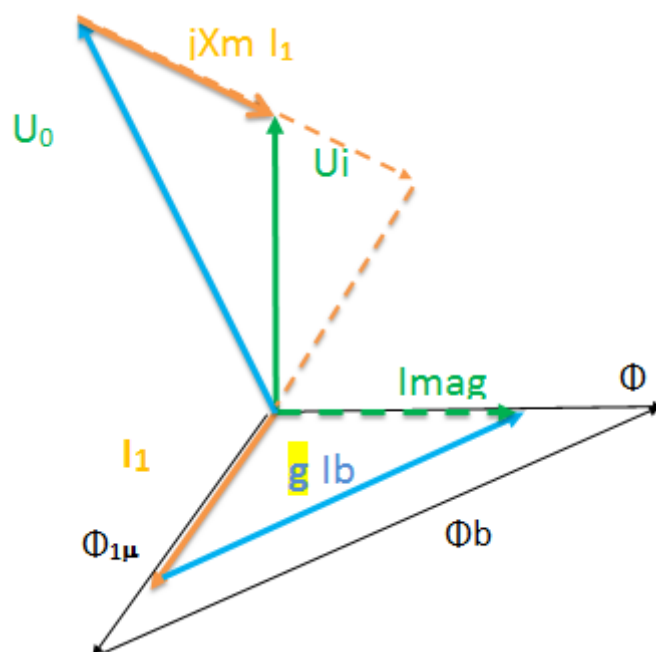


Obr. 5-8 Náhradní schéma SG (pro jednu fázi)

Pokusme se nyní udělat fázorový diagram pro zatížení RL zátěží, která je nejběžnější.

Z náhradního schématu vidíme, že rozdíl mezi U_0 a U_i je úbytek na magnetizační reaktanci:

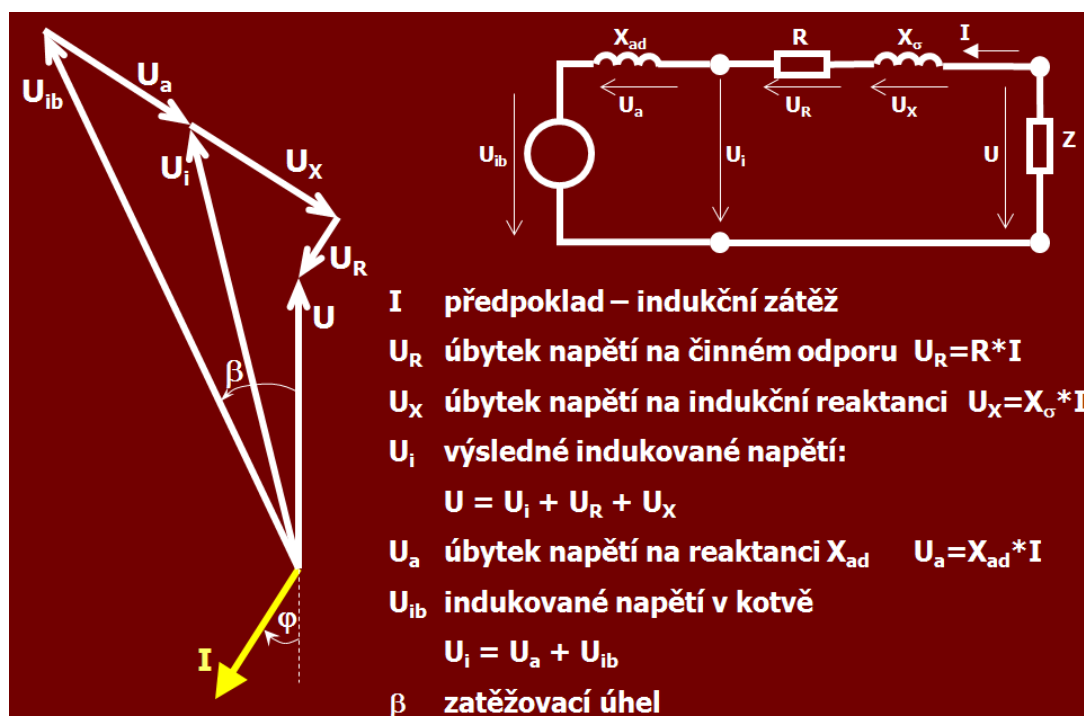
$$U_i = U_0 + j X_{1\mu} I_1 \quad (\text{g3})$$



Obr. 5-9 Fázorový diagram SG se zátěží RL ukazuje sečtení mg napětí a toků

Aby byl obrázek přehledný, neobsahuje úbytkový trojúhelníček na impedanci nakrátko statorového vinutí, který si pozorný čtenář umí doplnit podle toho, co zná z TRAFa. Pozorného čtenáře možná zarazí **fázor** (DC!) **budicího proudu**, ale jemu frekvenci dodá **mechanická rychlost rotoru**!

Když doplníme úbytky na všech prvcích, dostaneme úplný fázorový diagram:



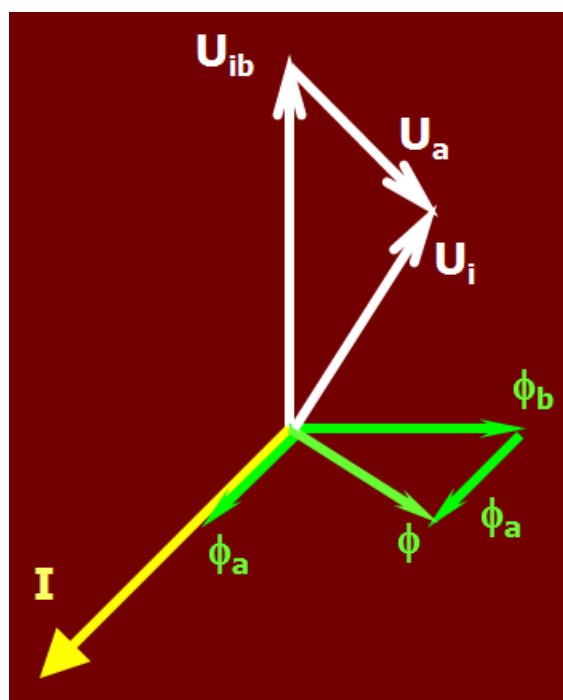
Obr. 5-10 Úplný fázorový diagram SG s RL zátěží

Zde nás bude zajímat hlavně **zatěžovací úhel β** , který je ukazatelem stability chodu SG. Čím je větší tím jsme blíže maximu momentu a také blíže možnosti výpadku ze synchronizmu, ale to už je trochu složitější problém, který nebudeme detailně studovat.

Ještě jeden pěkný základní fázorový diagram, který ukazuje vliv reakce kotvy, když proud statoru je prakticky ve fázi se svorkovým napětím, tedy prakticky činná zátěž. Tok reakce kotvy je označen Φ_a . Všimněme si kolmost fázorů toku a napětí, které indukují, zde dvojice $(\Phi_b - U_{ib})$ a $(\Phi - U_i)$.

$$\Phi_b + \Phi_a = \Phi$$

(g4)



Obr. 5-11 Fázorový diagram SG se skládáním toků

Generátor na tvrdé síti

Dosavadní analýzy a úvahy jsou užitečné pro provoz v ostrovní síti, třeba pro provoz EC v polních podmínkách.

Častější je provoz SG ve velké a mohutné síti, která mu vnutí jak napětí, tak kmitočet, a provozovatel elektrárny může ovlivnit jen výkon – a to jak činný tak jalový.

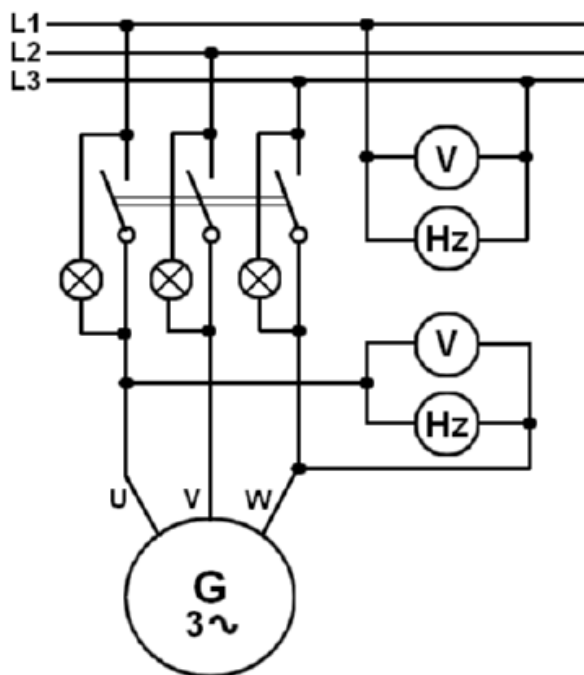
Než začneme analyzovat SG na tvrdé síti musíme ho k ní úspěšně připojit a k tomu je třeba splnit následující podmínky:

Postup NAFÁZOVÁNÍ SG:

1	Stejný SLED FÁZÍ	A – B – C	nebo A – C – B	Přehození 2 fází z jedné strany ☺
2	Stejná FREKVENCE	$f_{\text{GEN}} = f_{\text{SÍŤ}}$	$f = p \cdot n / 60$	Změnou rychlosti
3	Stejné NAPĚTÍ	$U_{\text{GEN}} = U_{\text{SÍŤ}}$	$U = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N \cdot kv$	Změnou Φ =přibudit / odbudit !!!
4	Stejné okamžité hodnoty	Překrytí „SINUSOVEK“		$\Delta U \rightarrow IK$ MAXIMÁLNÍ $\Delta U = 2Uf$

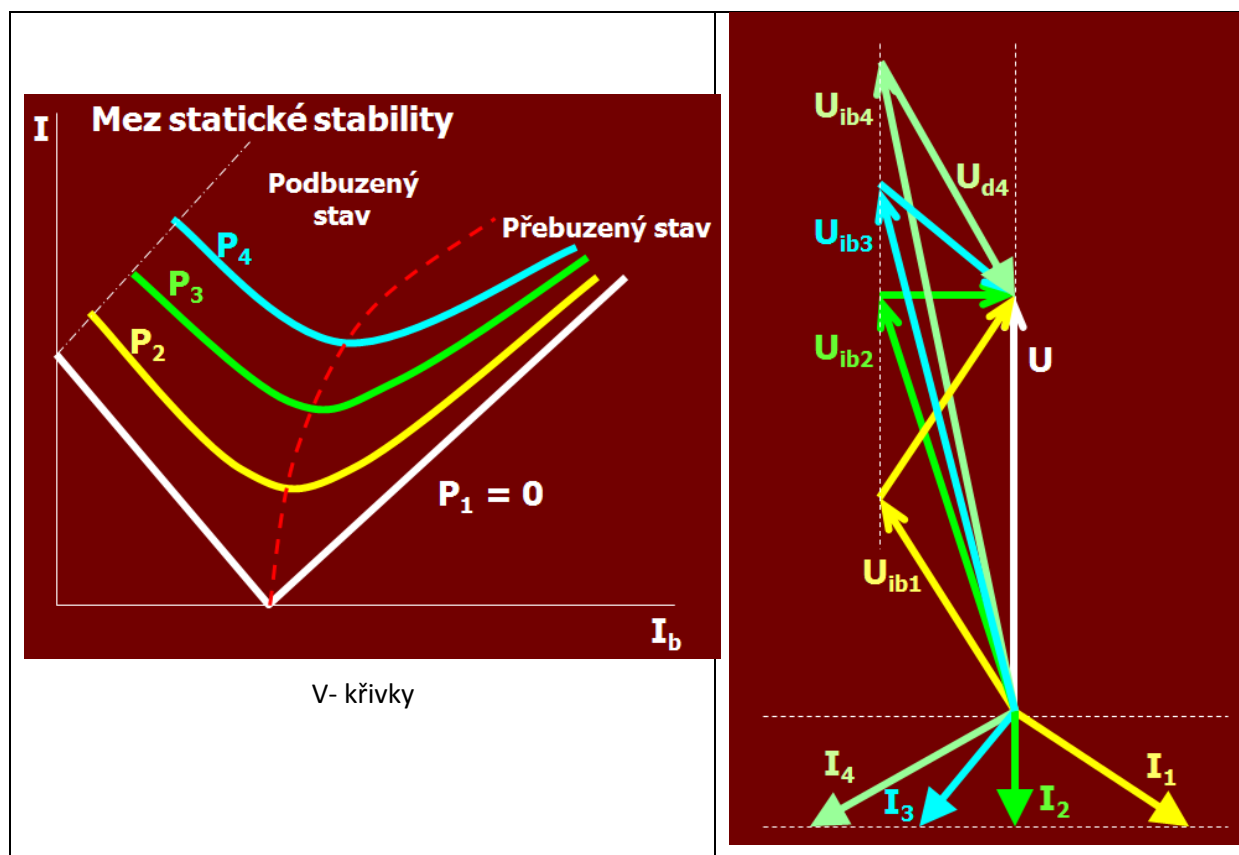
Podmínky se kontrolují a plní v uvedeném pořadí, nedodržení podmínek může vést ke **katastrofě**, protože i když splníte první tři a máte z obou stran vypínače stejné napětí, stejné frekvence i sled fází, tak v nejméně příznivém okamžiku jsou síť a SG v protifázi a spínáme tak „do zkratů“ **dvojnásobek fázového napětí**, což může vést až k utržení SG ze základů, každopádně však k potrhání vinutí kotvy obrovskými dynamickými silami od zkratových proudů. Když si dáte voltmetr na pozici žárovek v obrázku pro nafázování, napětí se zde bude pohybovat v rozmezí 0V – 2Uf a **sepnout se musí**

v okamžiku nulového napětí na kontaktech. Pokud se používají žárovky u synchronizace SG na NN síť 400/230V, tak se vždy použijí 2 žárovky v sérii.



Obr. 5-10 Zapojení pro nafázování SG na tvrdou síť

Když jsme ve správný okamžik sepnuli vypínač a SG je spojen se sítí, tak při stejných napětích mezi nimi nepoteče žádný proud.



Obr. 5-11 V-křivky SG na tvrdé síti

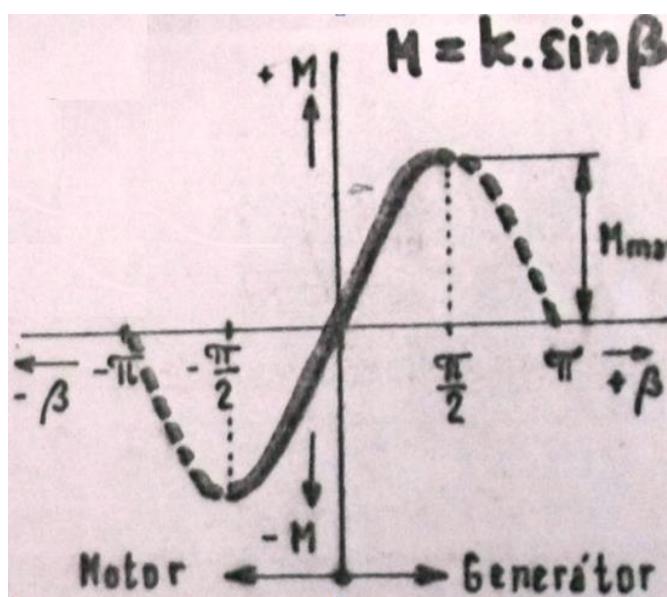
Co se stane když nyní začneme SG odbuzovat? Sóló SG by snížil napětí na svorkách, ale tady síť napětí udrží a na rozdíl reaguje dodávkou proudu do SG – dodávaný proud má čistě jalový charakter a má dobudít SG, který jsme my odbudili, takže bude ze sítě dodáván jalový výkon a SG bude jeho příjemce, bude se z hlediska sítě chovat jako ideální indukčnost.

Naopak si položíme otázku, co se stane, když náš přífázovaný SG začneme přibuzovat – jeho napětí zas síť podrží, takže nestoupne, ale proud mezi sítí a SG se postará o odbuzení a bude dodávat jakový výkon do sítě jako ideální kondenzátor (kapacitor). To vše můžeme sledovat na první V-křivce (bílé).

Když dodáme zvýšený výkon na hřídeli (více páry nebo vody), tak začneme dodávat do sítě činný výkon (kW, MW...). Na sérii V-křivek pro různé činné výkony můžeme vidět, jak přibuzováním, nebo odbuzováním měníme při stálém výkonu velikost proudu kotvy, tedy měníme účinník (když výkon i napětí jsou stejné!). Na obrázku vpravo si všimněme, že změnou velikosti statorového proudu při konstantním statorovém napětí se mění výrazně vnitřní napětí U_0 (ne U_i , to se zde předpokládá totožné se svorkovým), které s odbuzováním logicky klesá. Toto odbuzení má vliv na stabilitu chodu SG, protože snižuje velikost maximálního momentu a následně zvyšuje zátěžový úhel. Bez odvození vztah pro moment

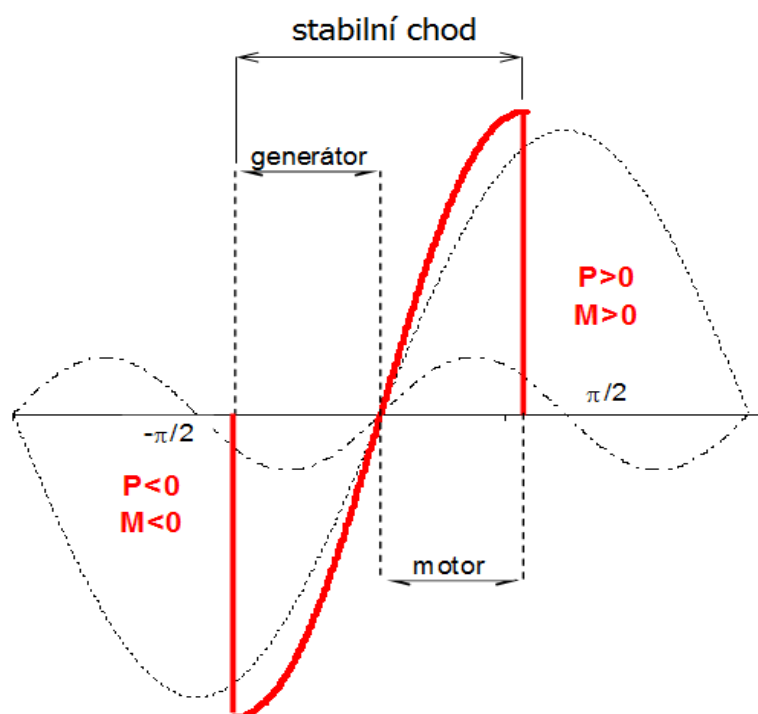
$$M = M_{MAX} \sin \beta \quad (g5)$$

Okolo pracovního bodu dochází ke kývání stroje a toto nesmí způsobit **vypadnutí ze SYNCHRONIZMU** které znamená ukončení funkce generátoru, nutnost stažení hnacího momentu na nulu a opětovné FÁZOVÁNÍ. Podbuzený SG, který pracuje do kabelového vedení (= C zátěž) má nízkou hodnotu M_{MAX} a je ohrožen častými výpadky.

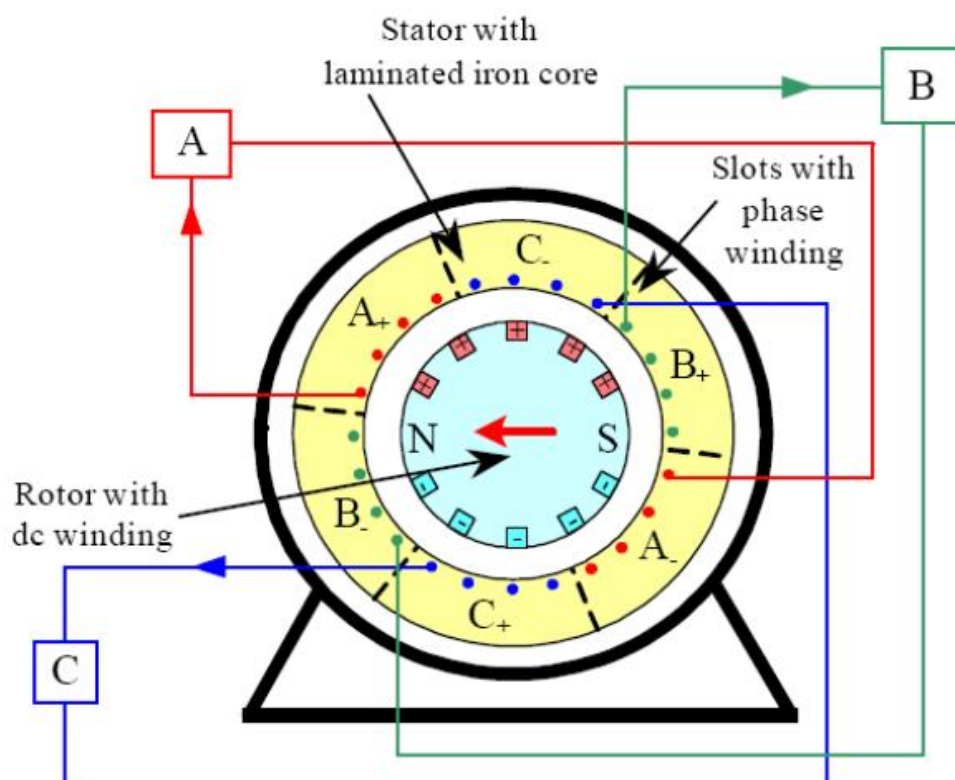


Obr. 5-12 Závislost momentu na zátěžném úhlu β

Vyniklé póly, díky nestejně magnetické vodivosti různě široké vzduchové mezery mají kromě synchronního momentu ještě RELUKTANČNÍ moment který se sčítá s momentem synchronním a deformuje momentovou charakteristiku podle obrázku:



Momentová charakteristika SG $M(\beta)$ pro stroj s **vyniklými póly**

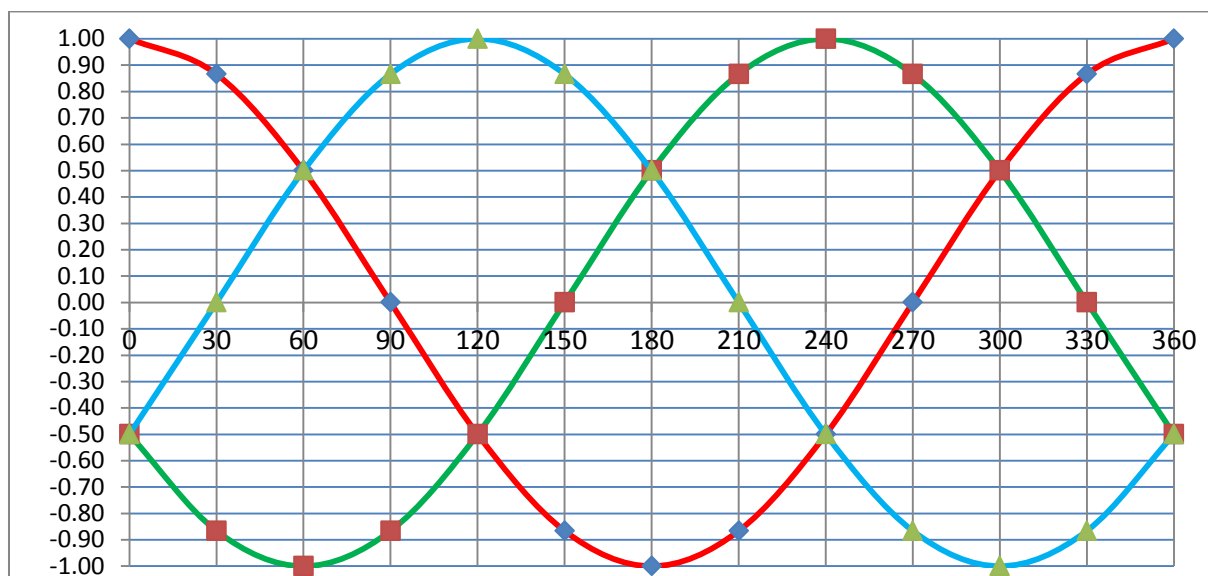


Dvojpólový SG s hladkým rotorem v řezu

SYNCHRONNÍM MOTOREM se v tomto kurzu rovněž nebudeme zabývat!

Točivé pole

Ze synchronního generátoru máme trojfázovou soustavu napětí – a proudů (německy **DREHSTROM!**)

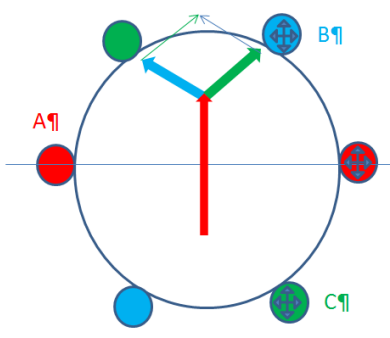
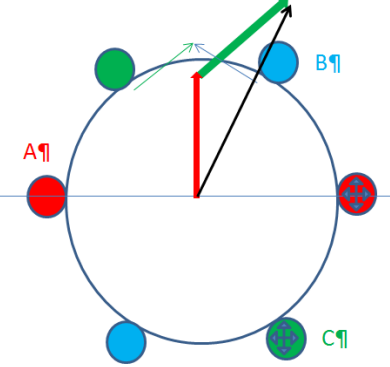
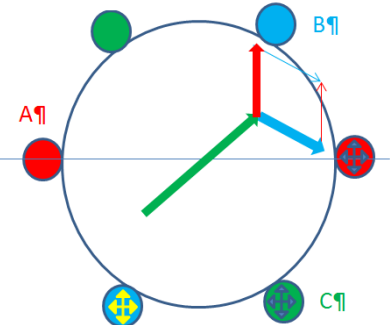


Trojici cívek, **PROSTROVĚ pootočených o 120° to je $2/3\pi$ (radiánů)**, budeme napájet soustavou **fázově (ČASOVĚ) posunutých proudů** podle obrázku. Vyšetření provedeme pro tři různé časy, kdy jsou okamžité hodnoty proudů v jednotlivých fázích takovéto:

V čase $\omega t = 0$	$I_A = +1 I_{max}$	$I_B = -\frac{1}{2} I_{max}$	$I_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_{max}$
V čase $\omega t = \pi/6$	$I_A = +\frac{\sqrt{3}}{2} I_{max}$	$I_B = 0$	$I_C = -\frac{1}{2} I_{max}$
V čase $\omega t = \pi/3$	$I_A = +\frac{1}{2} I_{max}$	$I_B = +\frac{\sqrt{3}}{2} I_{max}$	$I_C = -1 I_{max}$

CÍVKY máme označeny stejnou barvou jako jejich napájecí proudy. Každá cívka samostatně, pokud je napájena střídavým proudem, vytváří pole PULZUJÍCÍ, velikost pole každé cívky se pohybuje mezi **$+\Phi_{max}$ a $-\Phi_{max}$** , ale jelikož jsou všechny 3 cívky v jednom prostoru, budou se všechna 3 pole sčítat do pole výsledného, které si pro několik časových okamžiků vyšetříme:

Písmeny A, B, C označíme **začátky** cívek (posunutých o 120°), dále zavedeme **kladný směr** proudu do začátku cívky směrem k sobě (dopředu), pokud je okamžitá hodnota proudu záporná, proud poteče dozadu, tedy od nás. Pak podle Ampérova pravidla pravé ruky určíme směr toku dané cívky (kolmo na plochu dané cívky). Směr vidíme na obrázku, a velikost dostaneme z geometrie.

	$\omega t = 0$ $\Phi_v = 1,5 \Phi_{max}$
	$\omega t = \pi/6$ $\Phi_v = 1,5 \Phi_{max}$
	$\omega t = \pi/3$ $\Phi_v = 1,5 \Phi_{max}$
... a dál lze plynule pokračovat dokola	

Vidíme, že VELIKOST MAGNETICKÉHO POLE SE NEMĚNÍ, je pořád 1,5 násobek maxima pole od jedné fáze a JEN SE OTÁČÍ – O STEJNÝ ÚHEL V PROSTORU, JAKO JE ÚHEL V ČASOVÉM PRŮBĚHU proudu,

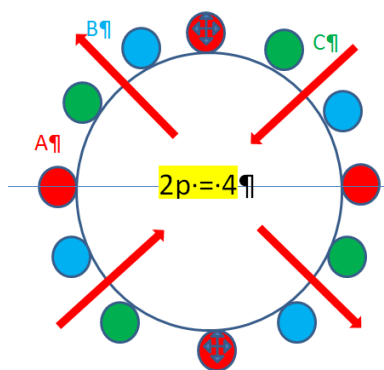
$$\omega_{MECH} = \omega_{EL} \quad (p1)$$

přesně řečeno, toto platí jen pro dvojpólové vinutí, které má každou cívkou přes polovinu obvodu. Pro vícepólové vinutí se pole otáčí pomaleji, takže za jednu periodu (360° elektrických) se otočí jen o dvě pólové rozteče – třeba od Severu k Jihu a dalšímu Severu (180° mechanických).

Na příkladu čtyřpólového vinutí ($2p = 4$) vidíme, jak teče proud cívkami jedné fáze (A), jak se vytvoří tok uvnitř cívkou a mezi cívkami. Z obrázku neplyne, jak jsou propojeny strany cívek, lze tedy vidět buď 4 cívkou jedné fáze nebo jen dvě cívkou této fáze, obě varianty se používají.

Vztah mechanické a elektrické rychlosti (úhlové) je:

$$\omega_{MECH} = \omega_{EL} / p \quad (p2)$$



Na dalším obrázku je příklad zapojení šestipólového vinutí $2p = 6$ rozloženého v 36 drážkách, v každé fázi jsou 3 pólpárové cívky, počet drážek na pól a fázi $q = 2$.

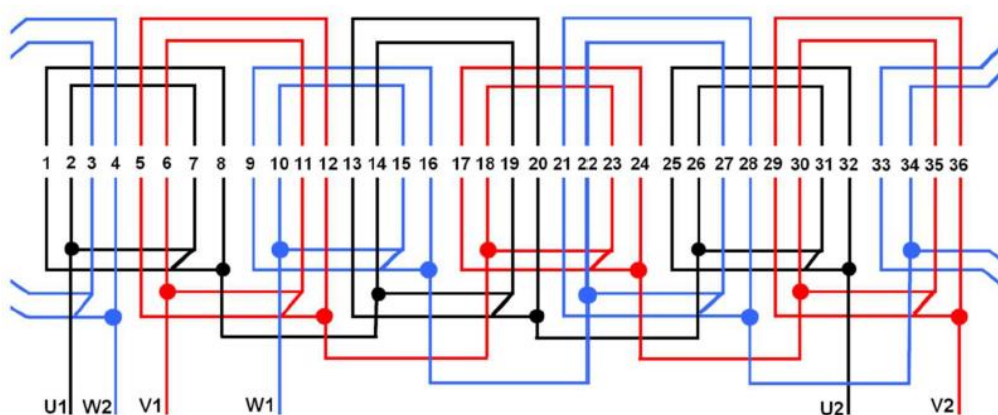
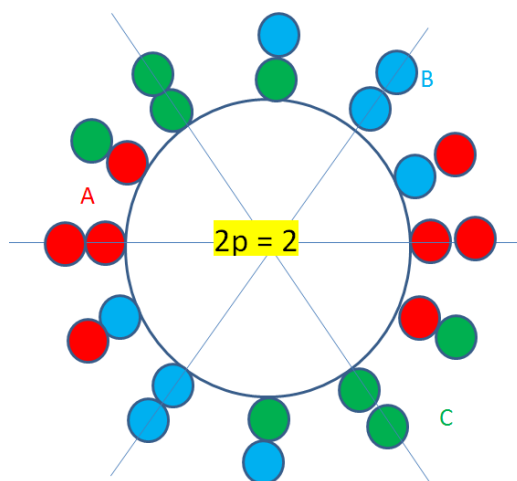


Schéma jednovrstvého dvoupólového vinutí $2p = 6$

Na dalším obrázku je demonstrace vinutí se zkráceným krokem, kdy zkrácení na $5/6$ optimálně vyloučí 5- a 7- harmonickou z indukovaného napětí, tím se sníží parazitní momenty, zvýší účinnost, ale o něco se sníží hodnota toku cívky (postihneme faktorem vinutí k_v), musí se při konstrukci přidat na délce svazku plechů, nebo na počtu závitů, ale vlastnosti AM selepší.



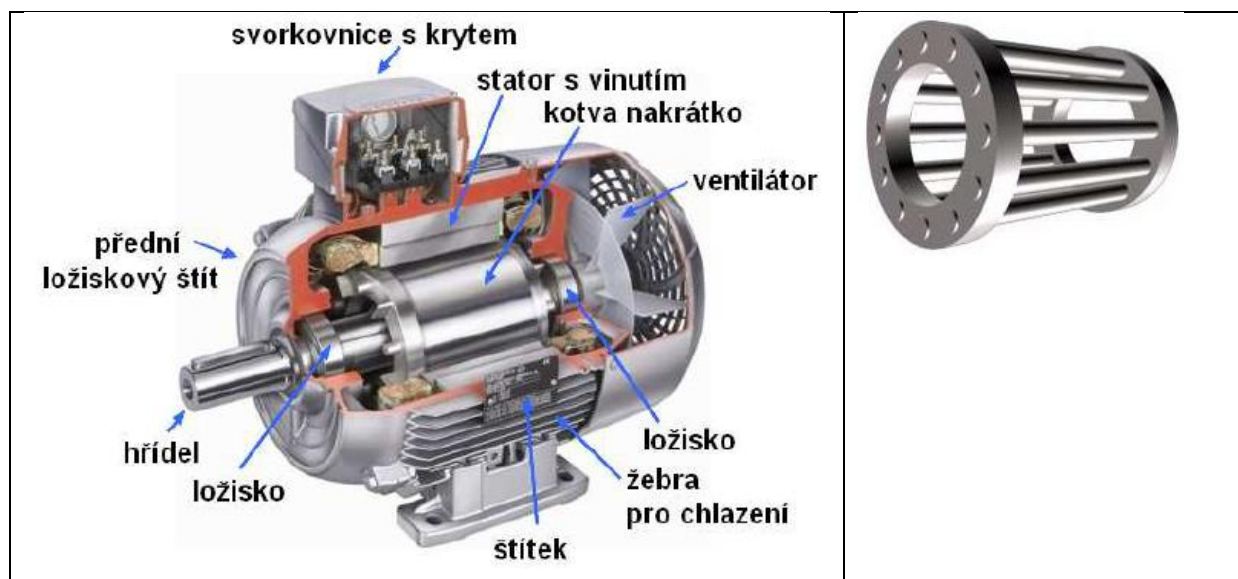
6. Asynchronní motor INDUKČNÍ

Před studiem této kapitoly je nutno nastudovat kapitolu 3

Jedná se o motor, který je na pohled velmi jednoduchý, výrobně i provozně je nejlevnější, takže se hojně vyskytuje ve všech možných aplikacích. Co se ale týká nároků na pochopení jeho činnosti, tak z vlastní zkušenosti vím, že jsem ho nepochopil nejen na ZDŠ, ale ani na SVŠ, ba ani po zkoušce na EF z Teorie strojů, kdy už jsem uměl nakreslit náhradní schéma i fázorový diagram, napsat rovnice a nakreslit charakteristiky, popsat možnosti rozběhu a regulace, jsem nechápal... A začalo se mi rozjasňovat, až když jsem si tento motor sám počítal a navrhoval, ... A POZDĚJI MNOHO LET ZKOUMAL v různých nestandardních režimech, takže je třeba se napřed spoustu věcí naučit, než se propojí do smysluplné mozaiky ☺

ASYNCHRONNÍ MOTOR – ZÁKLADY v kostce:

1. TŘÍFÁZOVÉ rozložené VINUTÍ NA STATORU – BUDÍ MAGNETICKÝ TOK (točivé pole)
2. TŘÍFÁZOVÉ VINUTÍ NA ROTORU – KROUŽKY (nebo KLEC – NEVYVEDENO NA SVORKY)
3. V ROTORU SE INDUKUJE NAPĚTÍ (**KOTVA**) ale NENÍ GALVANICKY NAPÁJEN
4. FUNGUJE JAKO NATÁČIVÝ TRANSFORMÁTOR – STÁLÝ PŘEVOD, **PLYNULÁ** ZMĚNA FÁZE
5. PŘEVOD $p = N1_{kv1}/N2_{kv2}$
6. ZKRATOVANÉ ROTOROVÉ VINUTÍ – VELKÝ ROTOROVÝ PROUD!!!
MENŠÍ než zkratový proud TRAFA, ale vyskytuje se často (při KAŽDÉM SPUŠTĚNÍ)
 $I_k = (5 - 7) \times I_n$
7. ZABÍRÁ S TOČIVÝM POLEM VYTVÁŘENÝM STATOREM = VODIČ V MG POLI JE SÍLA – MOMENT
8. ROTOR SE URYCHLUJE, ALE TÍM SE V NĚM INDUKUJE MENŠÍ NAPĚTÍ s MENŠÍ FREKVENCÍ
9. KDYŽ SE DOSTANE DO SYNCHRONIZMU SE STATOROVÝM POLEM, NIC SE V NĚM NEINDUKUJE = NENÍ NAPĚTÍ = NENÍ PROUD = NENÍ MOMENT = NENÍ AKCELERACE = PŘES RYCHLOST (točivého) POLE MOTOR NEJDE!
10. VELKÝ PROUD NAPRÁZDNO (STATOREM) Z DŮVODU VZDUCHOVÉ MEZERY V MAG OBVODU **až 80% I_n**



AM kroužkový se používá, pouze pokud je třeba realizovat těžké rozběhy, jinak rotorové vinutí a kroužky činí motor dražší a náročnější na údržbu. Rotorová svorkovnice pak místo zkratu se připojí na spouštěcí odporník (trojfázový rotorový spouštěč). Tam kde stačí spojení vinutí nakrátko, se místo drahé technologie navíjení zejména při hromadné výrobě použije levnější klec, bez izolace se vodičem vyplní celá drážka a sníží se tak Joulovy ztráty v rotoru...

V okamžiku připojení statorového vinutí na síť začne AM odebírat velký proud podobně jako TRAFO nakrátko, jenže zatímco pro TRAFO je zkrat infarktová záležitost, běžný AM musí absolvovat i statisíce rozběhů, takže konstruktér mu zvýšil rozptylovou reaktanci.

Stator vytvořil magnetické pole = tok, v rotoru – kotvě je maximální proud, měl by být i maximální moment, bohužel situace je složitější a díky velkému fázovému posuvu mezi tokem a proudem, který nebyl u DC motoru je moment malý, více později.

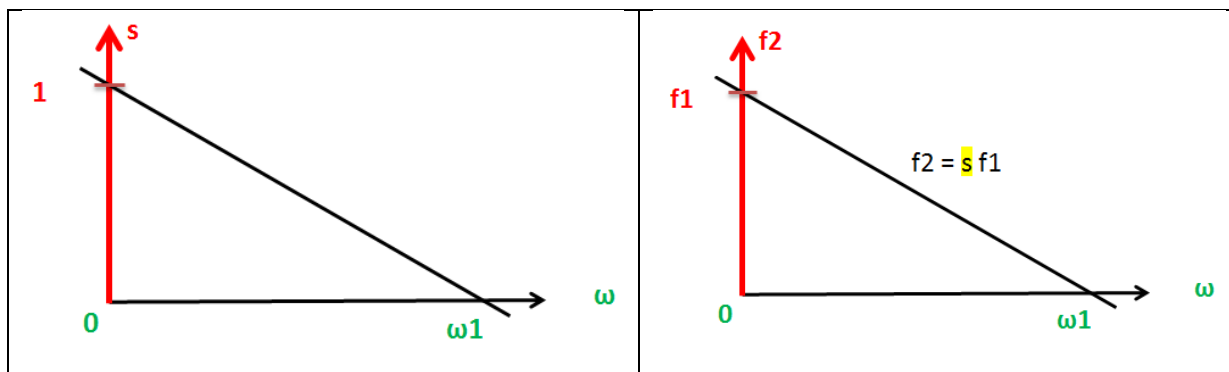
Jak se rotor rozbíhá, klesá relativní rychlost rotorových vodičů vůči poli a tedy i frekvence v rotoru. S poklesem frekvence klesá i napětí. Když se rotor blíží k synchronní rychlosti, blíží se nule indukované napětí v rotoru a tedy i rotorový proud a moment a urychlování skončí.

Zavedeme pojem **SKLUZ**

Synchronní rychlost ω_1 (n_1) je rychlost točivého pole a rychlost rotoru označíme ω (n).

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (\text{a1})$$

Skluz je rozdílové rychlost rotoru vyjádřená jako poměrná veličina (bezrozměrně). Pro nulovou rychlost je $s = 1$ a pro synchronní je $s = 0$ s lineární závislostí:



Změna rychlosti vyvolá změnu rotorové frekvence, pro stojící rotor je $f_2 = f_1$, pro rotor v synchronních otáčkách $f_2 = 0$, porovnáním obou závislostí lze napsat pro rotorovou frekvenci:

$$\boxed{f_2 = s f_1} \quad (\text{a2})$$

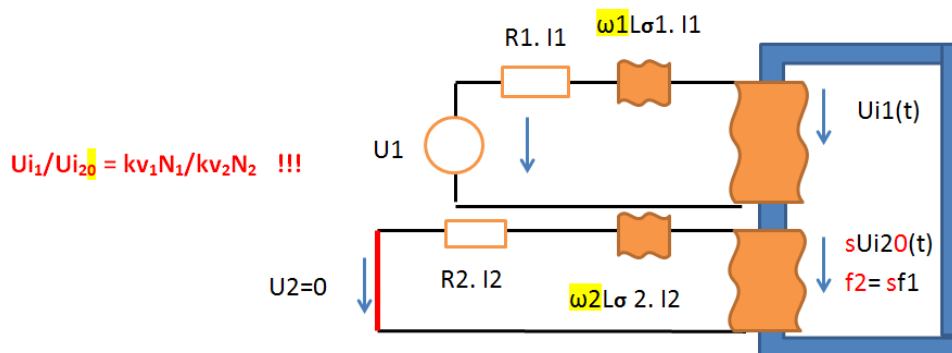
změna frekvence znamená změnu rotorového napětí

$$\boxed{U_2} = 4,44 f_2 \Phi N_2 k_{v2} = 4,44 s f_1 \Phi N_2 k_{v2} = \boxed{s U_{20}}$$

Samozřejmě se změnou frekvence se mění i reaktance, takže v rotorovém obvodu máme skluzové závislé indukované napětí a reaktanci a konstantní odpor vinutí (pokud nebereme vliv oteplení, skinefektu atd.).

Energie se do rotorového vinutí dostává stejně jako u TRAFA do sekundáru a pro další vyšetřování budeme používat vše, co jsme se naučili v kapitole 3. Existují 2 základní rozdíly:

1. Rotorové vinutí (sekundár) je zkratováno
2. V rotorovém obvodu je proměnné U_{i2} , takže nelze přepočítat!!!



K odstranění **proměnného napětí a frekvence** v rotoru **všechny prvky** rotorového obvodu vynásobíme $(1/s)$, tím zachováme jak výkonové tak fázové poměry, dostaneme konstantní napětí s konstantní frekvencí, tedy i konstantní reaktanci a proměnný (!) odpor – závislý na rychlosti.

V dalším kroku pak použijeme stejný přepočet rotorových veličin na stator převodem a kvadrátem převodu, jako u TRAFA. Dostaneme náhradní schéma:

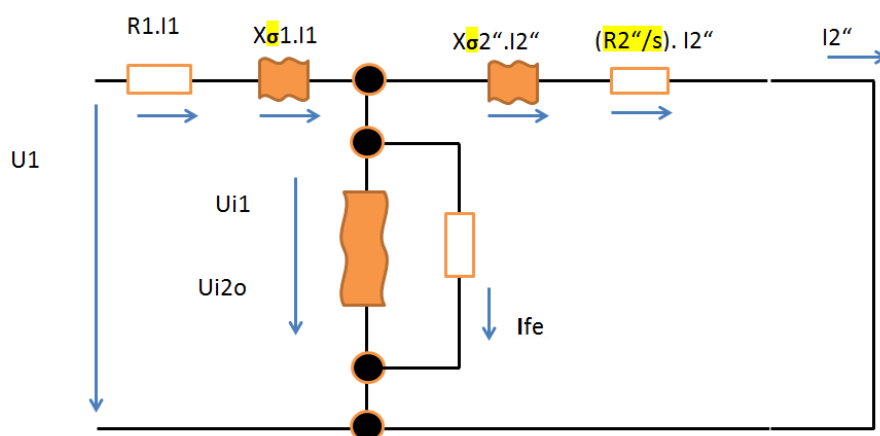
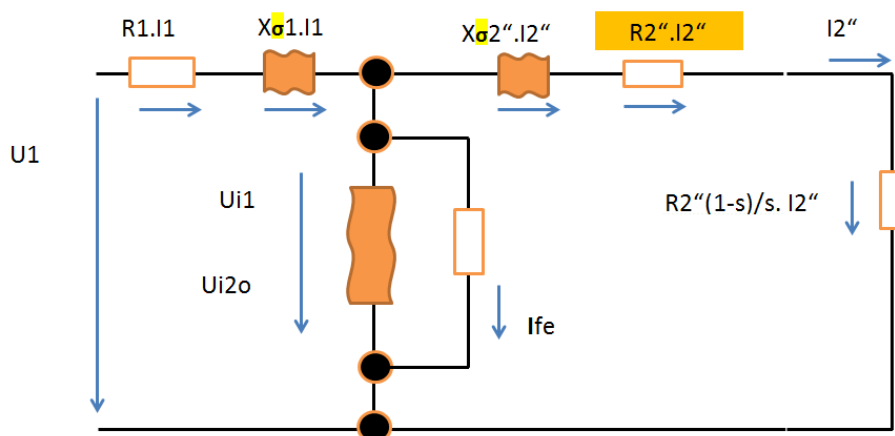


Schéma lze upravit takto:



Rozpadem odporu (R_2/s) na DVĚ ČÁSTI, oddělíme část, ve které vznikají **Joulovy ztráty** průchodem proudu a zbytek = **ZÁTĚŽ**, který představuje **činný výkon MECHANICKÝ**.

CHOD NAPRÁZDNO

Na rozdíl od TRAFA je v magnetickém obvodu vzduchová mezera (nutná k otáčení rotoru) a i když je pouhých několik desetin milimetru, znamená výrazně větší MAGNETIZAČNÍ PROUD, takže podle ampérmetru nelze poznat zatížení AM, jen podle wattmetru.

Chod naprázdno u TRAFA je s rozpojeným sekundářem, u AM ale nelze rozpojit rotor, nulový proud zabezpečíme tak, že se v rotoru nebude nic indukovat a to je při synchronní rychlosti, prakticky měříme při chodu bez zatížení, kdy skluz je téměř nula. ZTRÁTY naprázdno, když odečteme Joulový ztráty ve vinutí statoru od proudu naprázdno mají dvě složky:

- v železe (závislé na toku = napětí) R_{Fe}
- mechanické (ložiska, tření o vzduch, větrák...) ΔP_{MECH}

V modelu na rozdíl od skutečnosti s rostoucí rychlostí roste hodnota odporu (R_2/s), která v synchronismu dosahuje hodnotu (R_2/s) = ∞ , co vede k nulovému rotorovému proudu, ve skutečném motoru je nulový proud z důvodu nulového U_{i2} .

CHOD NAKRÁTKO

SPOJENÍ rotorového vinutí NAKRÁTKO je trvalé, pro měření parametrů je třeba zabezpečit v rotoru plné napětí a to je při statorové frekvenci, takže musíme rotor zabrzdit. Krátkodobě stav nakrátko nastane při každém rozběhu AM připojením na plné napětí a na rozdíl od DC motoru se zde rozběh s postupným zvyšováním napětí uplatnit nedá, nebo jen bez zátěže.

ROVNICE AM:

Vyjdeme z náhradního schématu kde se dopustíme menší nepřesnosti přepojením příšné větve T-článku z napětí U_{i1} na napětí vstupní U_1 . Pak lze v jediné smyčce vyjádřit VELIKOST rotorového proudu (přepočtenou na stator) takto:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{1r} + X_{2r})^2}} \quad (a3)$$

Když známe rotorový proud, lze vypočítat výkon (činný!) přenesený do rotoru, budeme ho označovat indexem pro vzduchovou mezera delta (δ).

$$P_\delta' = 3 \frac{R_2}{s} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{1r} + X_{2r})^2} \quad (a4)$$

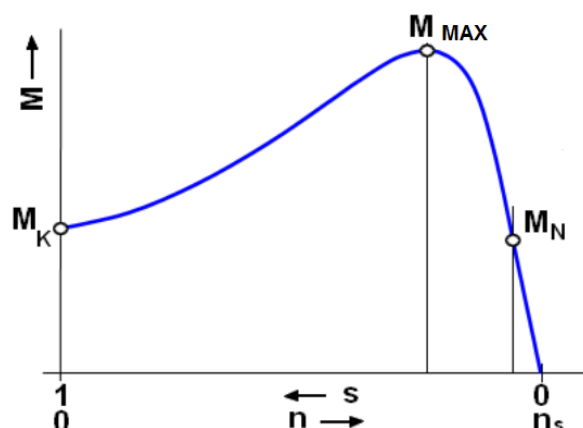
Moment dostaneme, když mechanický výkon podělíme mechanickou (úhlovou) rychlostí

$$M = \frac{P_{MECH}}{\omega} = \frac{(1-s) P_\delta}{(1-s) \omega_1} \quad (a5)$$

Takže z výkonu P_δ a synchronní rychlosti dostaneme moment:

$$M = \frac{3}{\omega_1} \frac{R_2}{s} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{1r} + X_{2r})^2} \quad (a6)$$

Tato rovnice obsahuje skluz jednak v hyperbolické a také v kvadratické funkci, takže není snadné jednoznačně určit průběh funkce, ale numericky snadno:



Vidíme, že pro **nulovou rychlost** (stav nakrátko, kdy je největší proud je moment M_K malý, někdy dokonce menší než jmenovitý M_N). Toto je důsledek fázového posunu mezi tokem Φ a rotorovým proudem I_2 . Takovéto problémy u DC strojů nejsou.

Charakteristika $M(s)$ má dva význačné body, jsou to M_K a M_{MAX} , u kterého potřebujeme ještě druhou souřadnici, kterou je skluz – nazývaný někdy skluz zvratu, nebo skluz maxima, označíme si ho s_M .

Derivací rovnice (a6) lze najít extrém, pro zjednodušení se zanedbá satorový odpor, protože v oblasti malých skluzů je $R_1 \ll (R_2/s)$. Dále součet rozptylových reaktancí označíme $X_K = X_{r1} + X_{r2}$. Pro skluz zvratu dostaneme:

$$s_M = \frac{R_2}{X_K} \quad (a7)$$

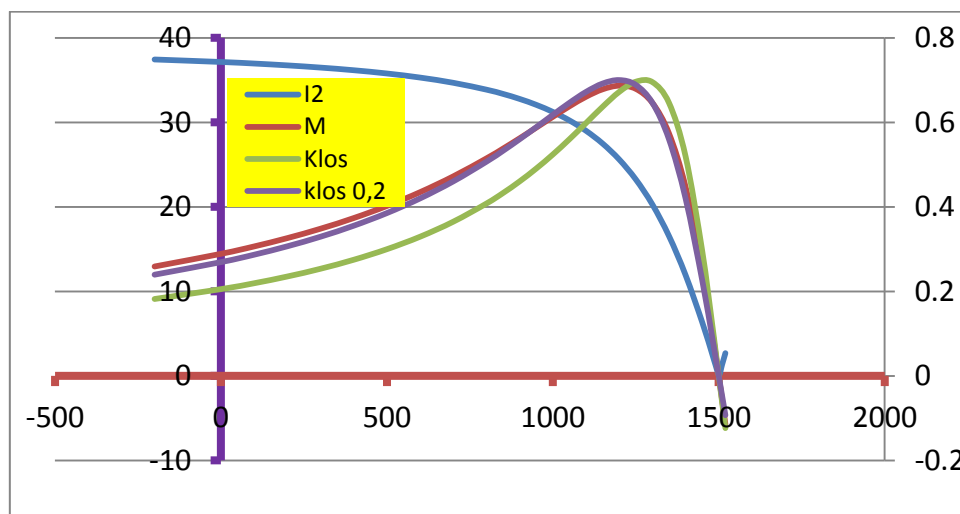
Dosazením do rovnice (a6) dostaneme velikost maximálního momentu:

$$M = \frac{3}{\omega_1} \frac{U_1^2}{2X_K} \quad (a8)$$

Velikost záběrného momentu dostaneme, když do rovnice (a6) dosadíme $s = 1$.

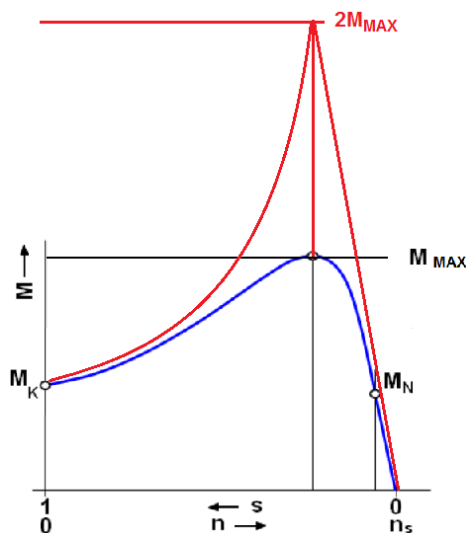
Ještě jednu rovnici si uvedeme, která umožní vytvořit celou momentovou charakteristiku, když známe souřadnice bodu maximálního momentu. Podle autora se nazývá Klossův vztah:

$$\frac{M}{M_{MAX}} = \frac{2}{\frac{s}{s_M} + \frac{s_M}{s}} \quad (a9)$$



Rovnice je odvozena pro lineární náhradní schéma s konstantními parametry, nefunguje dobře pro AM s vírovou kotvou nebo dvojitou klecí, ale když si uděláte numerický model s konstantními parametry, shoda je opravdu velmi dobrá. Na obrázku vidíte porovnání obou modelů a je tam i vliv nepřesného zadání skluzu zvratu na charakteristiku podle Klossa.

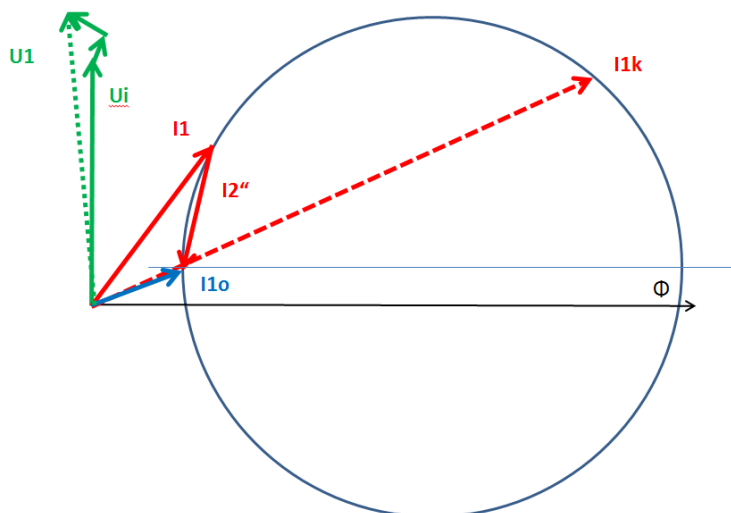
v oblasti malých skluzů lze rovnici dále zjednodušit a vede na rovnici přímky, v oblasti záběru pak na rovnici hyperboly, obě zjednodušené se protínají v bodě $(2M_{MAX}, s_M)$.



Modelování momentové charakteristiky v EXCEL[®]-u je náplní **laboratorního cvičení!**

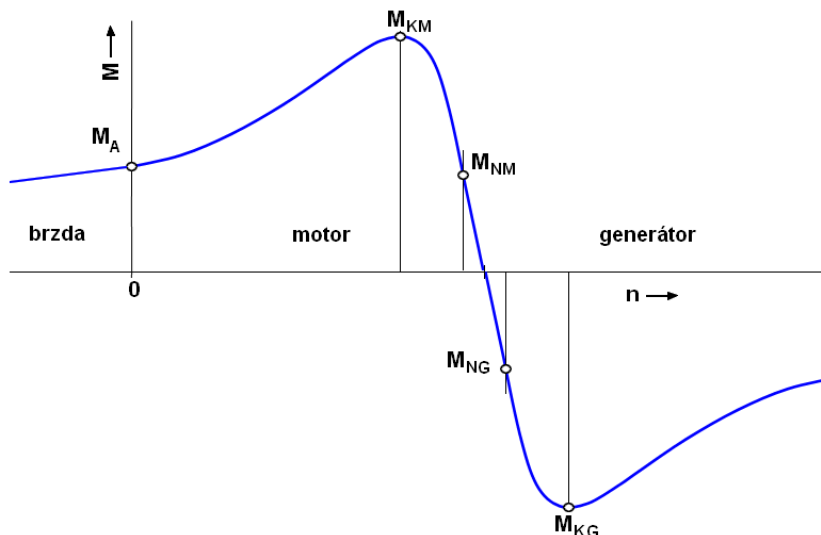
FÁZOROVÝ (a kruhový) DIAGRAM

Fázorový diagram se kreslí stejně jako pro TRAFO, ale proud rotoru se určuje z mechanické zátěže, s rostoucí zátěží roste činná složka I_2 a zlepšuje se účinnost, zajímavý je **kruhový diagram**, který už dnes v době výpočetní techniky nemá takový význam jako dřív, ale je zajímavé vědět, že statorový proud os chodu naprázdno po chod nakrátko se pohybuje po kružnici:

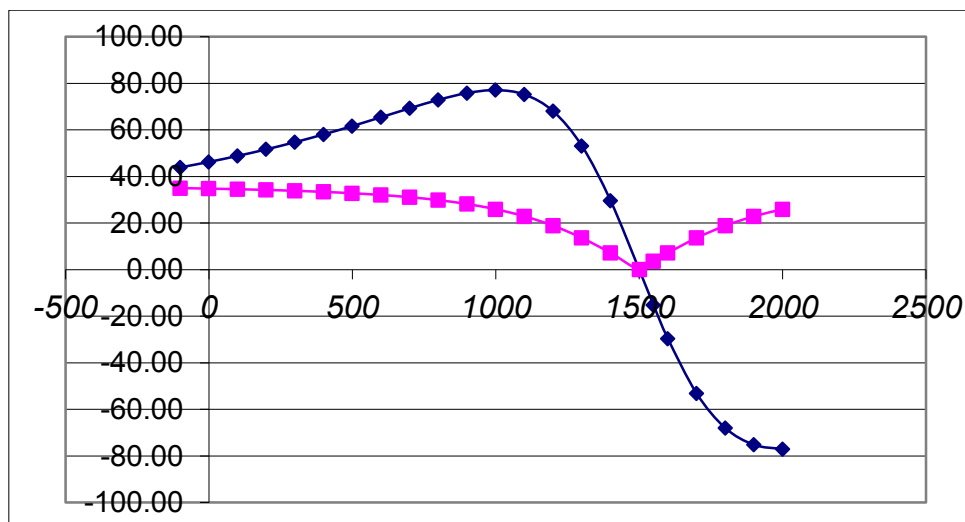


Výkonový diagram je podrobně popsán v návodech na LABORATORNÍ CVIČENÍ

Z kruhového diagramu lze vysledovat i situaci v oblasti generátoru, když dodávkou mechanického výkonu na hřídel se dostaneme do nadsynchronní rychlosti, moment pak změní znaménko a výkon bude záporný – AM přešel do režimu generátoru. Na rozdíl od SG stále odebírá jalovou energii ze sítě, kterou potřebuje na vytvoření magnetického toku. Pokud je AG na odlehlé, místě, tak lze dodávat jalovou energii z kondenzátorové baterie, aby jalový proud zbytečně nepřetěžoval vedení. Momentová charakteristika pro širší rozsah otáček je zde



Na dalším obrázku je kromě momentu i rotorový proud, zde u střídavého proudu nemá smysl hovořit o záporných hodnotách, v synchronismu je nulový a pak opět roste. Statorový proud je podle fázorového diagramu větší o proud naprázdno, který je ale třeba přičítat v komplexní rovině, nelze jednoduše sečíst ampéry!

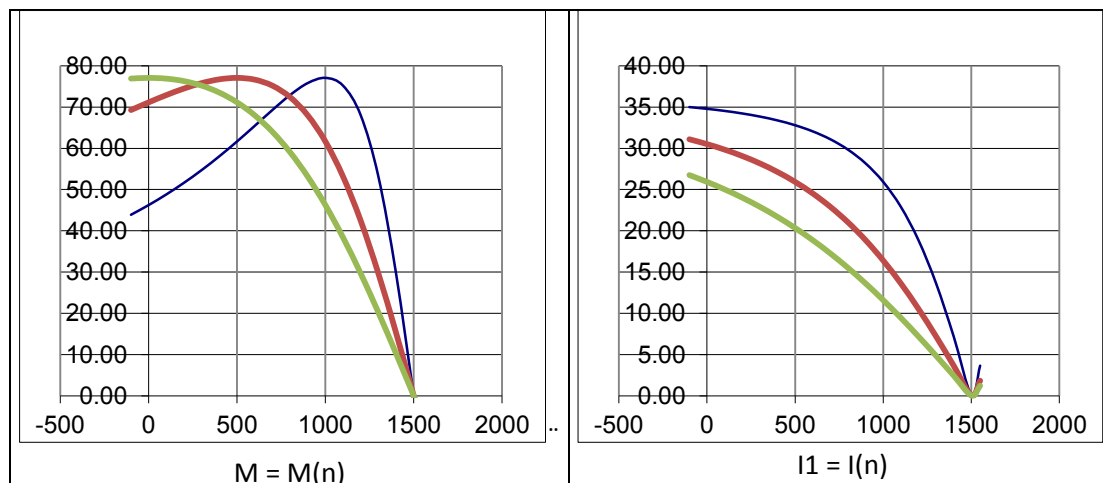


Rotorový proud (fialový) a moment (modrý) pro čtyřpólový AM

Zatím nebyl zdůrazněn **vliv napětí** na charakteristiky AM, když se podíváme na (a3) a (a7) vidíme, že snížením napětí se proud zmenší lineárně, ale moment kvadraticky a tak snížení napětí třeba v důsledku delšího přívodu, nebo měkkého zdroje má za následek, že jinak správně dimenzovaný AM není schopen zátěž rozběhnout a po kratší době nakrátko velký záběrný proud vypne jištění pohonu. Vždyť pokles napětí na 70% U_n sníží moment (celou charakteristiku) o více než 50%! ($0,7^2 = 0,49$)

Ani spotřebiče s ventilátorovou charakteristikou není dobré regulovat napětím, protože při přechodu na nižší napětí se zvýší skluz a to vede ke zvýšení rotorových ztrát podle (a10). Speciální snížení napětí je přepínač Y/D který pro lehké rozběhy omezí záběrný proud, ale prodlouží se doba rozběhu zařízení a pokud jsou při chodu AM delší přestávky v zatížení a motor trvale běží, pak přepnutím zpět na Y se sníží příkon, protože AM pracuje s menším sycením a tedy nižšími ztrátami jak v železe, tak ve statorovém vinutí ($3R_{l0}^2$) díky sníženému proudu naprázdno.

Skluzová regulace má smysl pro těžké rozběhy, kde se přidáním rotorového odporu zvýší moment při současném poklesu proudu, jako příklad lze uvést roztáčení kolotoče s obrovským momentem setrvačnosti $J[\text{kg m}^2]$.



Závislost momentu a proudu na rychlosti pro skluzy zvratu 33, 66 a 100%

Práce na větších skluzech je ztrátová, čím větší skluz, tím více energie v rotoru se promění na teplo:

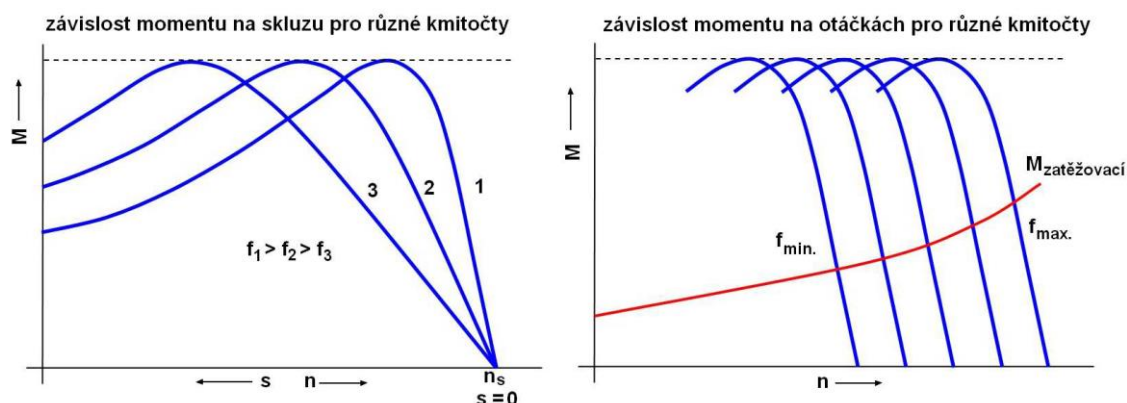
$$\Delta P_{cu2} = s P_{\delta} \quad (a10)$$

Regulace rychlosti se nejlépe provádí změnou napájecí frekvence, kterou se mění synchronní rychlost. Aby se udržela hodnota maximálního toku, zejména při snižování frekvence, musí se současně snižovat i velikost napájecího napětí, protože platí

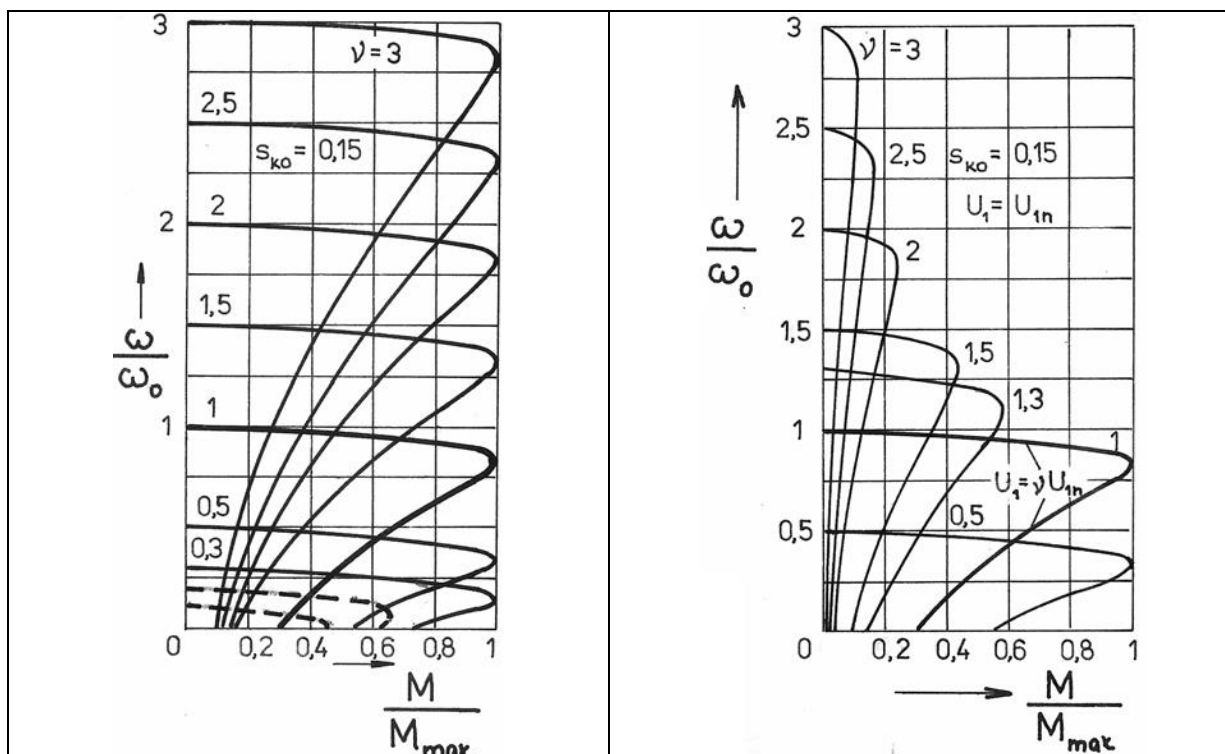
$$U = 4,44 f \Phi N k_v$$

A odtud plyne podmínka $U/f = \text{konst.}$

Snížení toku při vyšších frekvencích vede ke snižování maximálního momentu.

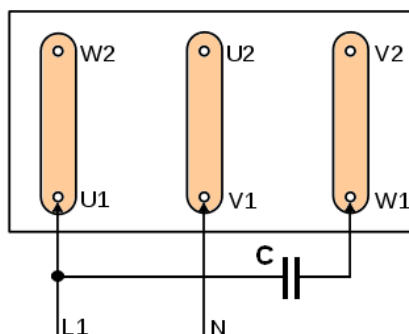


Zobrazme si ještě mechanické charakteristiky AM tak, jak jsme to dělali u DC motorů, na dalším obrázku je série charakteristik pro různé frekvence, které určují synchronní rychlost, vztaženou k nominální označené zde jako ω_0 , nalevo se udržuje U/f v celém rozsahu rychlostí, napravo pak nad nominální se udržuje konstantní U , takže tok ($\Phi \approx U/f$) klesá a obálka mechanických charakteristik AM připomíná hyperbolickou charakteristiku sériového DC motoru.

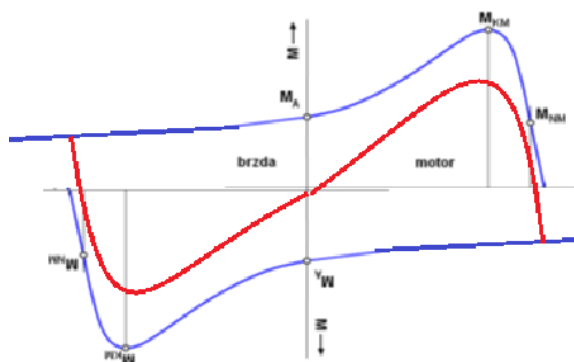


JEDNOFÁZOVÝ AM

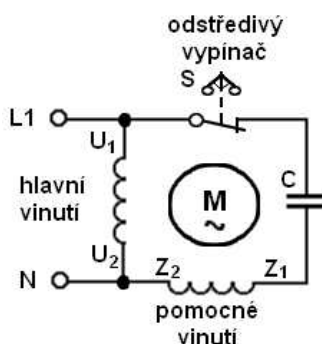
Tam kde není k dispozici trojfázová síť lze provozovat AM i z jednofázové, když zabezpečíme fázový posun proudu v různých vinutích, nejlépe pomocí kondenzátoru:



Vyrábějí se i jednofázové AM kde kromě Hlavního vinutí, existuje Pomocné (nebo rozběhové) vinutí, posunutá o 90° . Kdyby se napájelo proudem se stejným fázovým posunem, vytvořilo by se točivé pole – kruhové nebo eliptické a motor by se sám rozbíhal. Bez pomocné fáze se jednofázový motor nerozběhne, ale může se točit oběma směry, jelikož pulzující pole $+\Phi_{\max}$ a $-\Phi_{\max}$ lze pomyslně rozložit na dvě proti sobě se točící pole s amplitudou $\Phi_{\max}/2$. Tyto dají 2 momentové charakteristiky, které je třeba sečíst.



Pomocná fáze se často dimenzuje jen na krátkodobý chod a po rozběhu je odstředivým nebo časovým vypínačem (případně uvolněním rozběhového tlačítka) odpojena.



Malé jednofázové motory se mohou řešit místo s vinutím pomocné fáze se závitem nakrátko přes část pólu, který vytvoří časově posunutý tok, podobně jako ve střídavém elektromagnetu (více viz v kapitole 2).

Speciální kotvy

Kromě jednoduché kotvy se pro zlepšení záběrného momentu používají konstrukce s vířivou klecí (hlubokou drážkou), nebo dvojitou klecí. Princip spočívá ve **skinefektu**, který při velkých rotorových frekvencích – tedy malých rychlostech vytlačuje proud k povrchu drážky, čímž se účinně zmenšuje průřez rotorového vodiče, a tedy roste jeho odpor. Namísto vnějšího přidaného rotorového odporu spouštěče se vytlačením proudu v kleci docílí podobných výsledků, tedy snížení záběrného proudu při současném zvýšení momentu

Indukční regulátor a natáčivý transformátor

Patří do této kapitoly jako speciální provedení vzájemně natáčivých systémů. Na jejich podrobnější popis není dostatek kapacity, pokud se v praxi setkáte s trojfázovým regulovaným zdrojem **většího výkonu**, pravděpodobně to bude dvojitý indukční regulátor, který umožňuje plynulou regulaci trojfázového napětí bez kluzných kontaktů a bez změny fáze výstupního napětí. Regulační rozsah je 0 až $2U_1$. Při vstupu $3 \times 400V$ je výstup $3 \times 0 - 800 V$.

7. Závěr

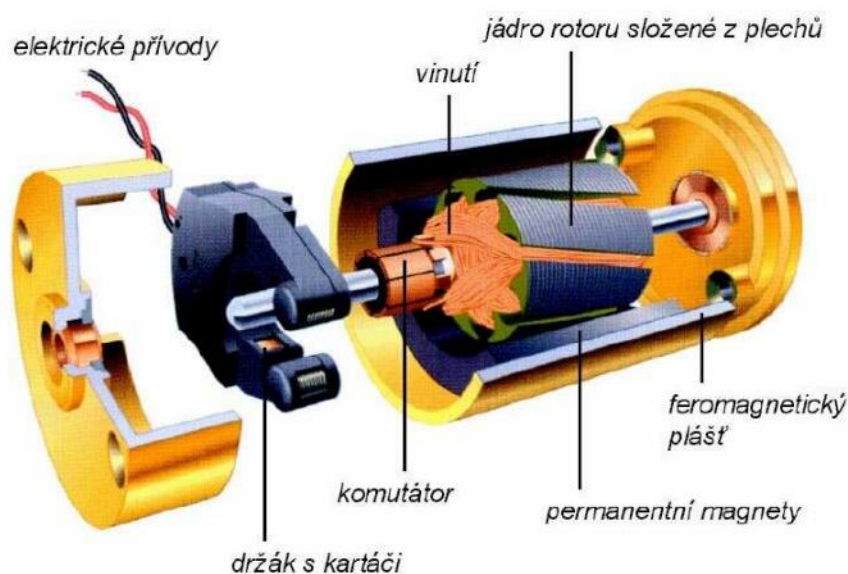
V praxi se setkáte se spoustou dalších typů ES, především motorů a motorků, které nepůjdou zcela zařadit do tohoto základního přehledu, automatizace a robotizace přináší mnoho různých nových pohonů, zejména v oblasti malých výkonů, v oblasti přesného polohování, motory integrované do regulátorů, ovladačů, ventilátorů a čerpadel, motorů pro zvláštní prostředí a také malých generátorů které snímají pohybové veličiny a převádějí je na elektrický signál.

Pokud pracují na elektromagnetickém principu, vždy musíte hledat dvě veličiny = magnetický tok a elektrický proud, které ve vzájemném působení dají mechanickou sílu.

Ani u těch třech základních typů ES jsme neprobrali zdaleka všechno, ostatní, jak budete potřebovat, naleznete v odborné literatuře, nebo dnes na webu, kde bohužel často publikují i „nekvalifikovaní autoři“ a tak je třeba tyto informace kriticky hodnotit, posuzovat se znalostí a konfrontovat z více zdrojů.

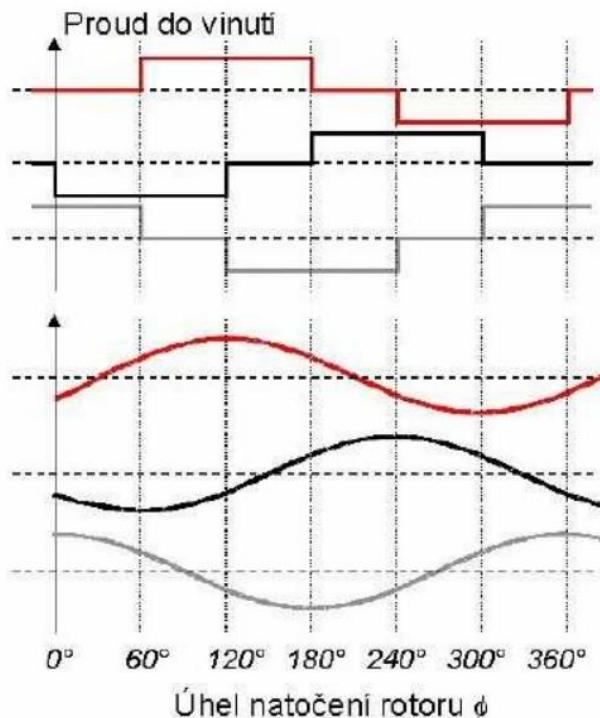


Bezkartáčový BLDC motor s elektronickým komutátorem a buzením PM ze vzácných zemin NdFeB

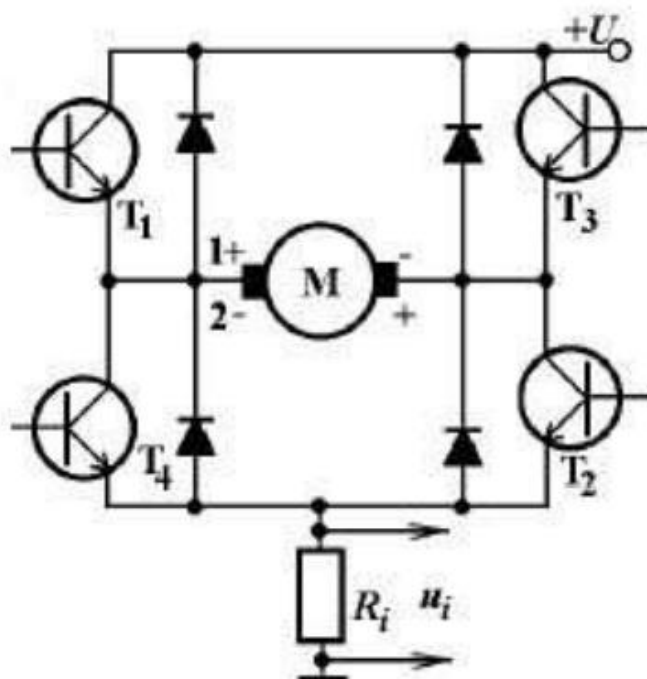


Malý motorek s PM buzením

V modelářských regulátorech bývají nejčastěji k řízení používány procesory **ATMEL** z důvodu dobré ceny. Někteří výrobci používají procesory DSP nebo specializované motorové kontroléry **se šesti PWM na čipu**. Jinak lze použít prakticky jakýkoliv procesor. [Citace Ing. Dvorský, MGM Compro]



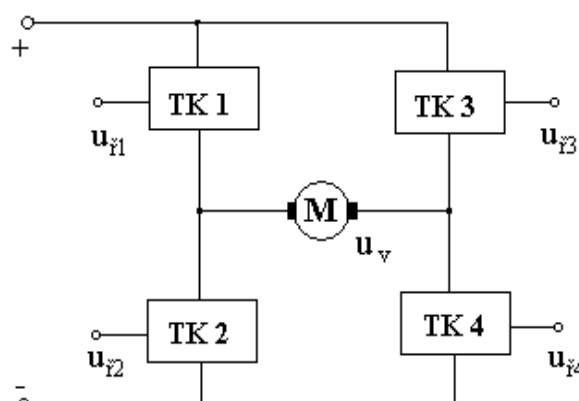
Obr. – Obdélníkový a sinusový průběh proudu do motoru



Obr. – Zapojení tranzistorů do H – můstku, použití pro čtyřkvadrantové řízení otáček stejnosměrného motoru, toto zapojení umožňuje řízení otáček v obou směrech v I. a III. kvadrantu i rekuperační brzdění motoru ve II. a IV. kvadrantu.

Změnu napětí lze také realizovat rychlou změnou plného napětí na motoru. Motor jako setrvačný stroj nestačí tuto rychlou změnu sledovat a jeho otáčky budou úměrné střední hodnotě protékajícího proudu. Zapojením čtyř spínačů podle obrázku se dosáhne možnosti měnit i směr otáčení motoru. Spínače TK1 až TK4 jsou ovládány řídicími napětími, která zajišťují jejich otevírání tak, aby byly nastaveny otáčky motoru na žádanou hodnotu. Řízení může být provedeno jednou z následujících metod:

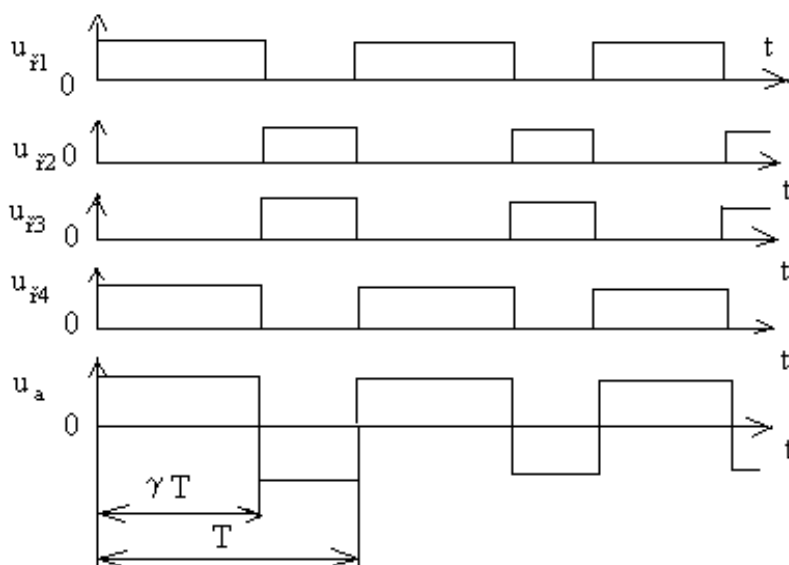
- symetrická metoda
- nesymetrická metoda
- postupná metoda



Princip mostového zapojení čtyř spínačů

U nejjednodušší symetrické metody se řídí všechny ventily mostu a na kotvu motoru přichází impulsy s proměnným znaménkem, jejich délka je řízena řídicími signály. Na obrázku je znázorněn průběh řídicích signálů, jejichž délka se může měnit od nuly, do intervalu T .

Relativní délku určuje koeficient α , který se mění v rozmezí $0 - 1$. Pro hodnotu $\alpha = 0,5$ je střední hodnota napětí na kotvě motoru rovna nule.



Symetrická metoda řízení stejnosměrného motoru

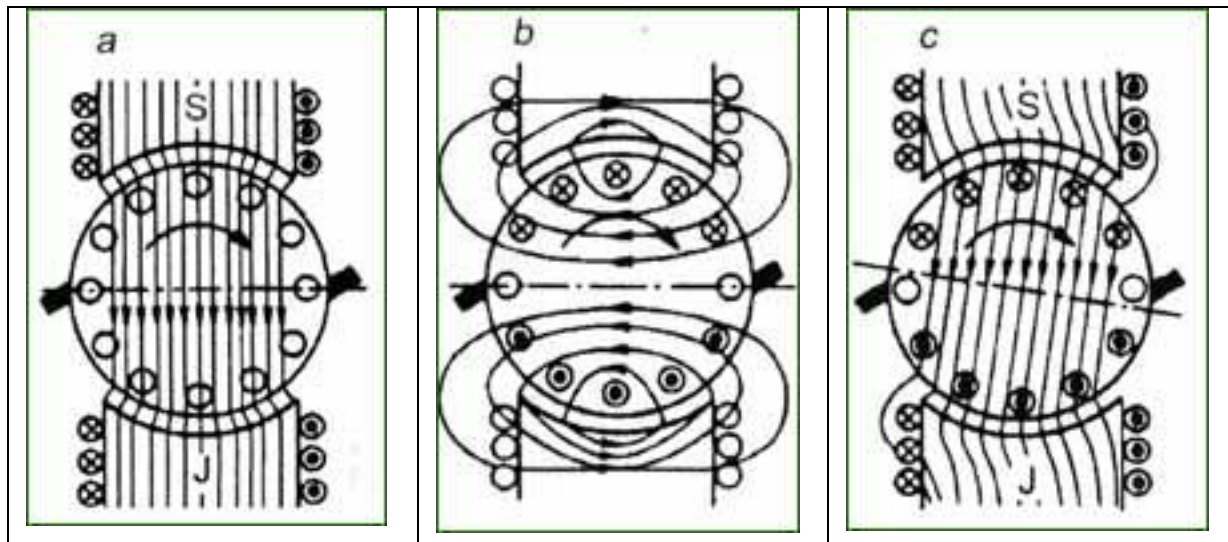
Tento způsob řízení se používá u pohonů malého výkonu. Jeho předností je jednoduchá realizace řídicího systému a neexistence zóny necitlivosti. Přiváděné napětí na kotvu má však proměnné znaménko, což může v některých případech způsobovat pulsaci momentu motoru. Kromě toho vznikají tepelné ztráty v železe i mědi, neboť i při střídě 1:1 je efektivní hodnota proudu nenulová. Měnič sestávající ze čtyř ventilů je napájen stejnosměrným napětím.

Napětí přiváděné na kotvu motoru je označeno u_a .

Reakce kotvy

Prochází-li vodiči kotvy proud, vytvoří se magnetické pole kotvy, které je kolmé na pole magnetů. Pole kotvy je závislé na velikosti proudu kotvy a jeho působení se nazývá reakce kotvy.

Na následujícím obrázku je znázorněno pole dvou pólového stroje nezatíženého (a), pole kotvy (b), je-li budící vinutí bez proudu, a výsledné magnetické pole (c) při zatížení.



Příčný magnetický tok kotvy deformuje a zeslabuje magnetický tok hlavních magnetů. Neutrální osa, která je při chodu naprázdno v příčném směru, se při zatížení vysunuje z tohoto směru:

- u dynama ve směru otáčení kotvy a
- u motoru proti směru otáčení kotvy.

Aby kartáče na komutátoru nejiskřily, je nutné osu kartáčů posunout do neutrální osy zatíženého stroje. U menších strojů jiskření zmenšujeme jen posunutím kartáčů do neutrální polohy při zatížení. U větších strojů se provádí kompenzace pomocnými (komutačními) póly. Jsou to úzké póly umístěné mezi hlavními póly. Aby magnetické toky reakce kotvy a kompenzace byly stejné při všech zatíženích, musí se vinutí komutačních pólů budit zatěžovacím proudem kotvy, tj. zapojit je v sérii.

Elektrotechnika, Fr. Krejčí, str. 26

VOŠ s SPŠE Fr. Křižíka <http://eespsprosek.cz/3m/opakovani.html>

