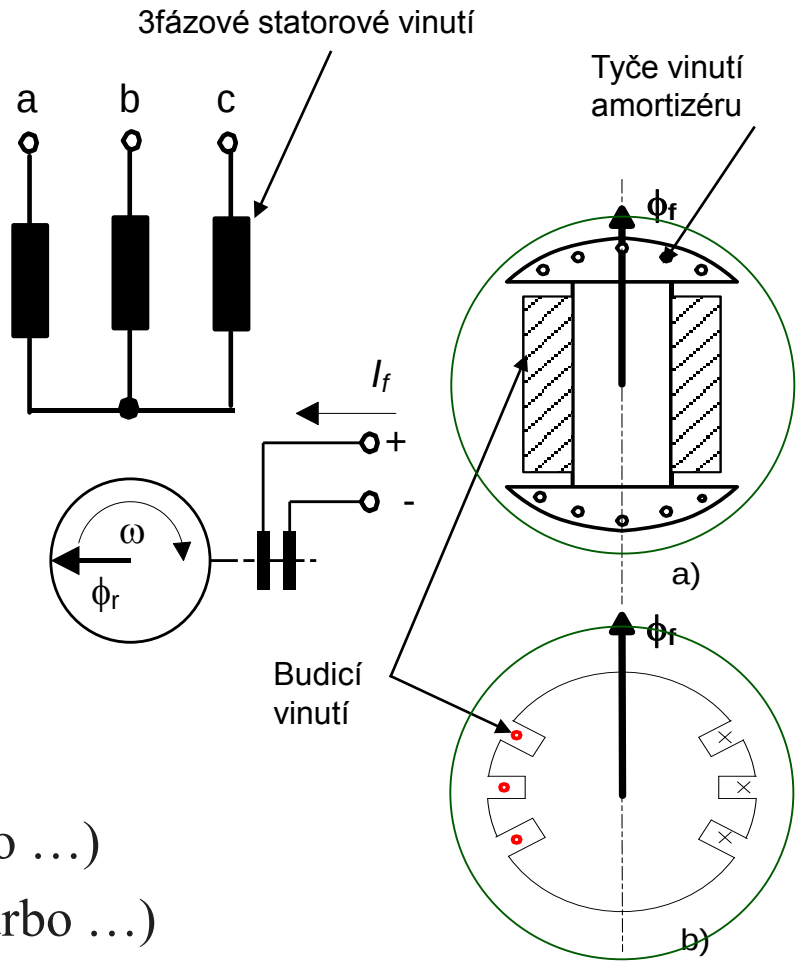
SYNCHRONNÍ STROJE

(Synchronous Machines)

B1M15PPE

USPOŘÁDÁNÍ SYNCHRONNÍHO STROJE

- **Stator:**
  - Trojfázové vinutí po 120°
  - Sinusové rozložení v drážkách
  - Připojení na trojfázovou síť
- **Rotor:**
  - Budicí vinutí napájené DC
    (různé budicí systémy)
  - Amortizér / tlumicí vinutí
    (tyče nakrátko)



- **Rotorové vinutí na pólech:**
  - vyniklé (a) – pomaluběžné stroje (hydro …)
  - hladké (b) – vysokorychlostní stroje (turbo …)

POUŽITÍ A VLASTNOSTI

- 3FÁZOVÉ GENERÁTORY PRO VELKOVÝROBU ELEKTŘINY
- MOTORY VELKÉHO VÝKONU S KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ
- SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY (řízení účiníku)

- **MOTOR:** TOK DC BUZENÍ NA POHÁNĚNÉM ROTORU INDUKUJE V AC VINUTÍ NA STATORU NAPĚTÍ
- **ALTERNÁTOR:** AC VINUTÍ NA STATORU NAPÁJENÉ TROJFÁZOVÝM PROUDEM, TOČIVÉ MAGNETICKÉ POLE ZABÍRÁ S TOKEM DC BUZENÍ NA ROTORU

Velikost indukovaného napětí (elektromotorické síly) statoru:

$$E = k.\Phi.\omega_e = \sqrt{2}.\pi.N_p.K_p.K_d.\Phi_m.f_e = \sqrt{2}.\pi.N_p.K_w.\Phi_m.f_e = 4{,}44.N_p.K_w.\Phi_m.f_e$$

Kmitočet indukovaného napětí

$$f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{p\omega_m}{2\pi} = \frac{\pi p n}{2\pi 30} = \frac{np}{60} \longrightarrow \boldsymbol{n = \frac{60 f_e}{p}}$$

ZÁKLADNÍ ČÁSTI SYNCHRONNÍHO STROJE

válcový stator a
3fázové statorové vinutí

rotorové cívky nasazené na vyniklých pólech

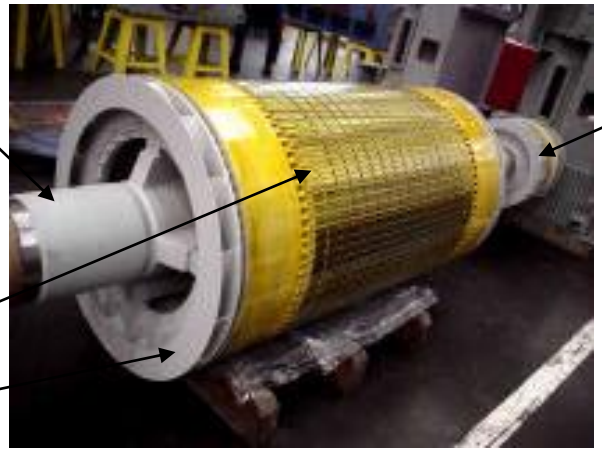
amortizační vinutí

hřídel

budič

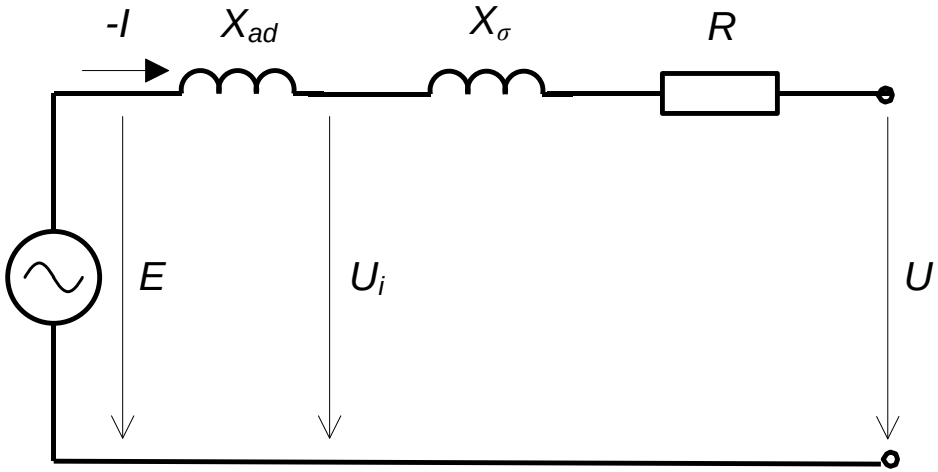
Rotorové cívky uložené v drážkách (hladký rotor)

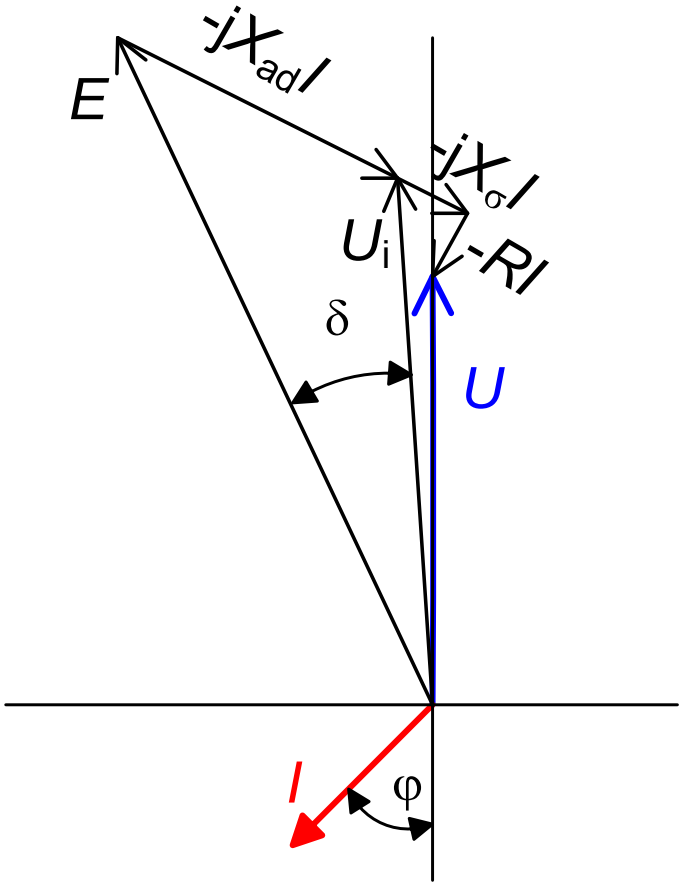
ventilátor



Obrázky z: http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-synchronous-motors-technical-article-english.PDF, (20.2.2013)

NÁHRADNÍ SCHÉMA (alternátor)





$$U = E - jX_{ad}I - jX_{\sigma}I - RI$$

X_{ad} → kotva

X_{σ} → rozptyl

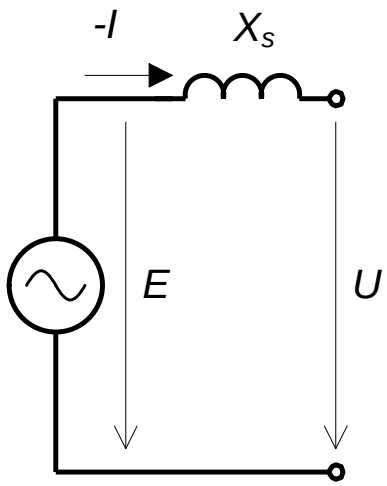
R → odpor vinutí kotvy (statoru)

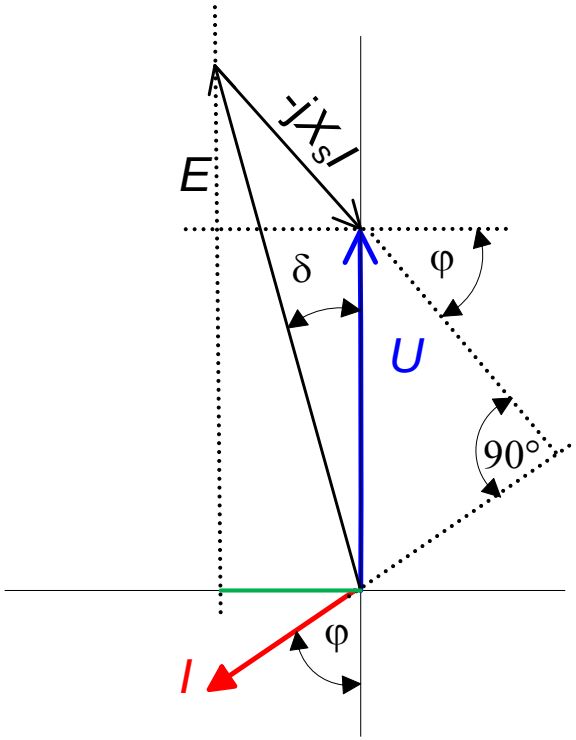
ZJEDNODUŠENÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA

$X_s = X_d$ → synchronní reaktance (respektuje existenci rozptylového toku a toku vyvolaného proudem I)

R → 0 (zanedbatelný proti X_d)

$$\hat{U} = \hat{E} + jX_s\hat{I}$$





$$E = 4{,}44 N_p K_w \Phi_m f_e$$

$$X_s \,.\, I \,.\, \cos\varphi = E \,.\, \sin\delta$$

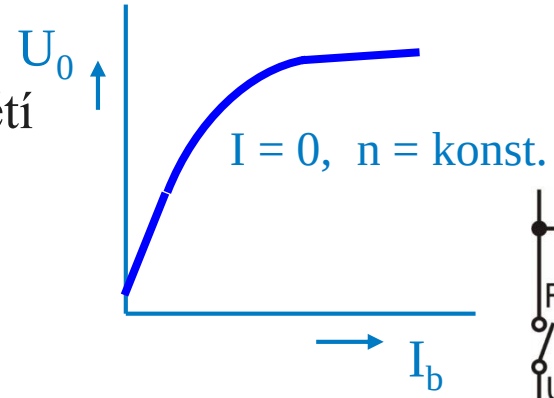
FÁZOVÁNÍ

PROCES PŘIPOJENÍ NOVÉHO GENERÁTORU K EXISTUJÍCÍ SÍTI.

PODMÍNKY

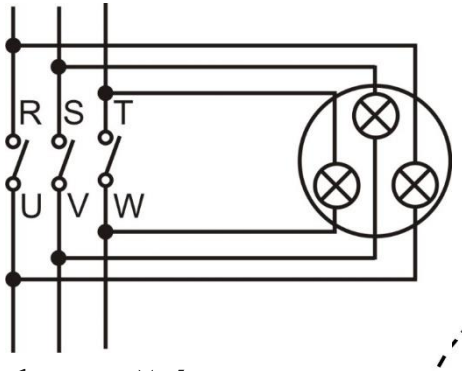
- Stejná velikost napětí

  $U_{sítě} = U_{generátoru}$



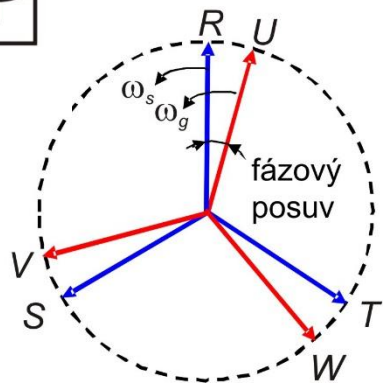
- Stejný sled fází

  $(a,b,c)_{sítě} = (a,b,c)_{generátoru}$



- Stejný fázový úhel shodných fázových napětí

  $Ua_{sítě} - Ua_{generátoru} \rightarrow 0$



- Stejné kmitočty

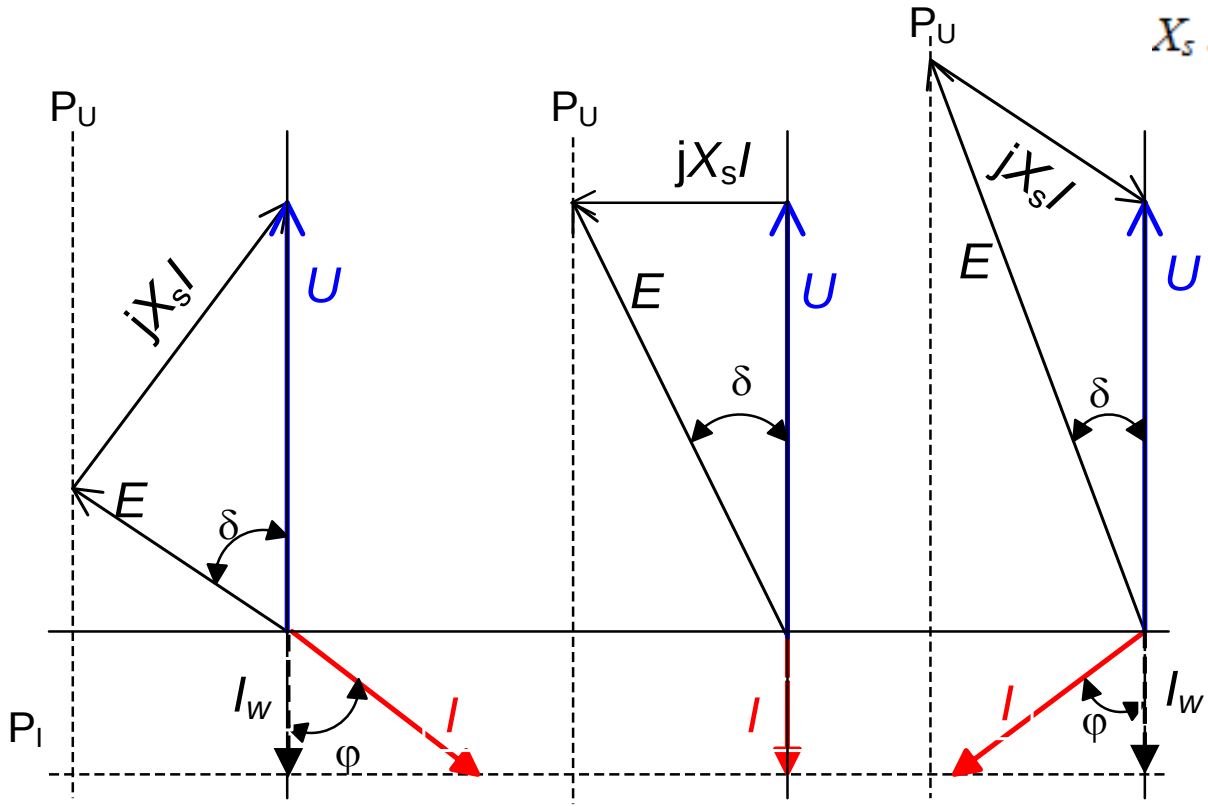
  $f_{sítě} = f_{generátoru}$ (kmitočet generátoru může být mírně vyšší)

$$f = \frac{p.n_1}{60}$$

TURBOALTERNÁTOR NA TVRDÉ SÍTI

TVRDÁ SÍŤ (nekonečného výkonu) = konstantní *U* a *f*

$$X_s \,.\, I \,.\, \cos\varphi = E \,.\, \sin\delta$$



odebírá jalový proud (L)
Podbuzený (zátěž RC)

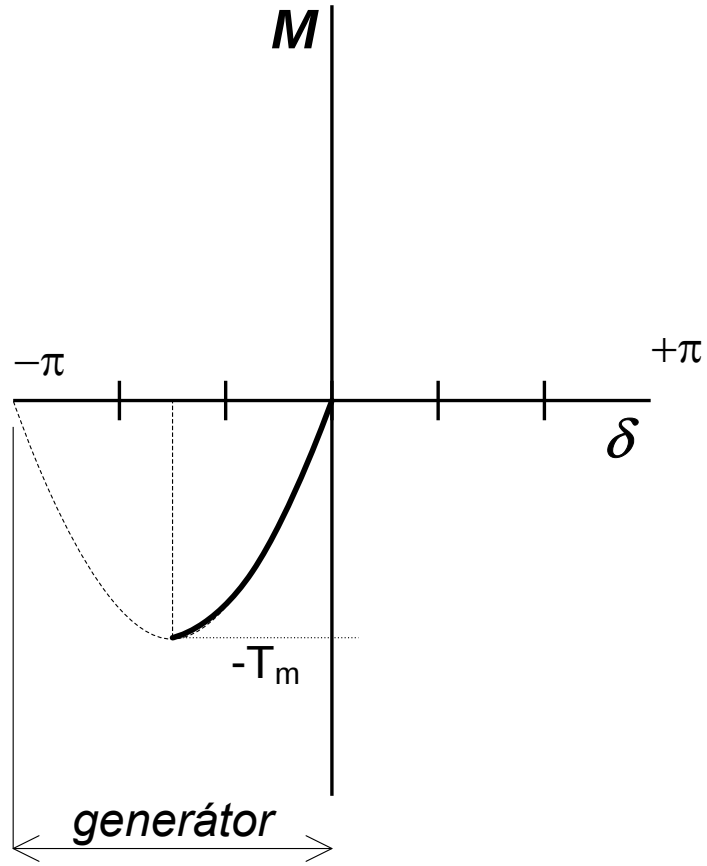
R zátěž

dodává jalový proud (C)
Přebuzený (zátěž RL)

MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA

$$X_s \,.\, I \,.\, cos\varphi = E \,.\, sin\delta$$

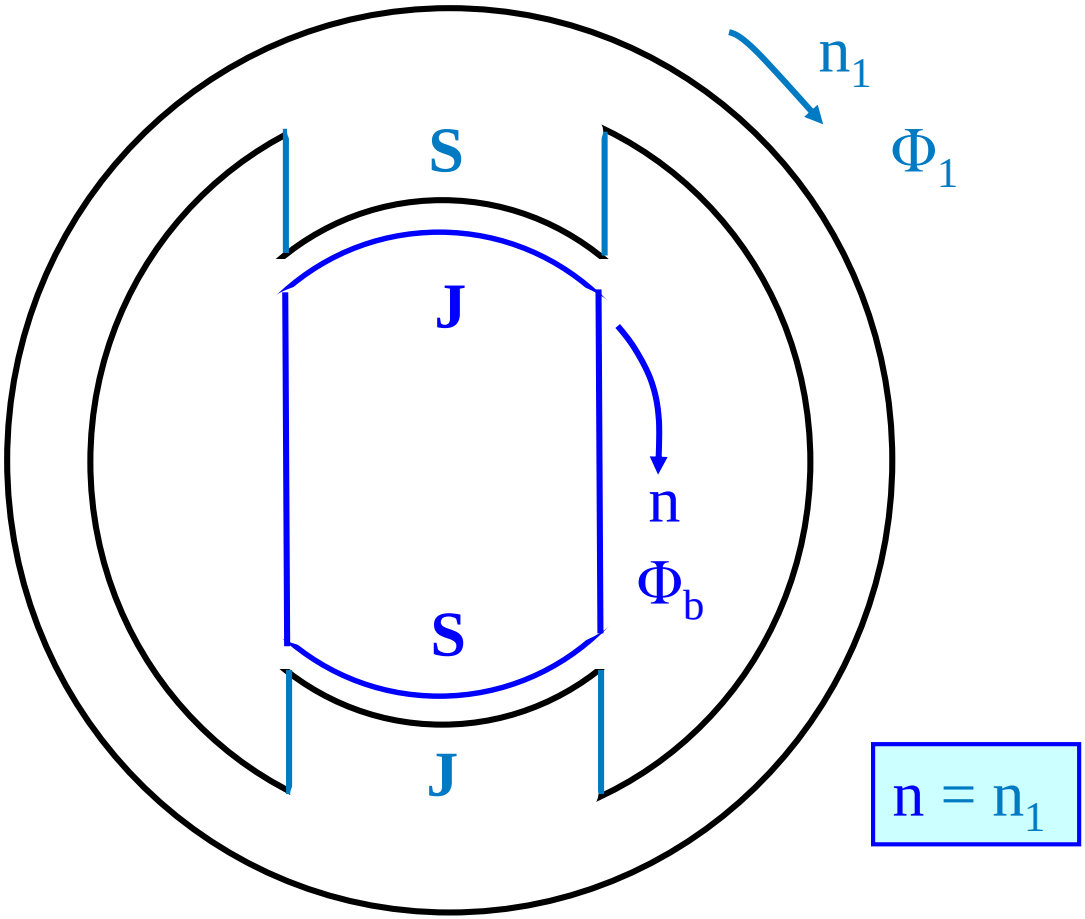
- $P_2 = 3UIcos\varphi = 3\frac{UEsin\delta}{X_s}$
- $P_1 = \omega_s M$
- $P_1 = P_2$
- $M = M_i = \frac{3UEsin\delta}{\omega_s X_s}$



δ = *zátěžný úhel*

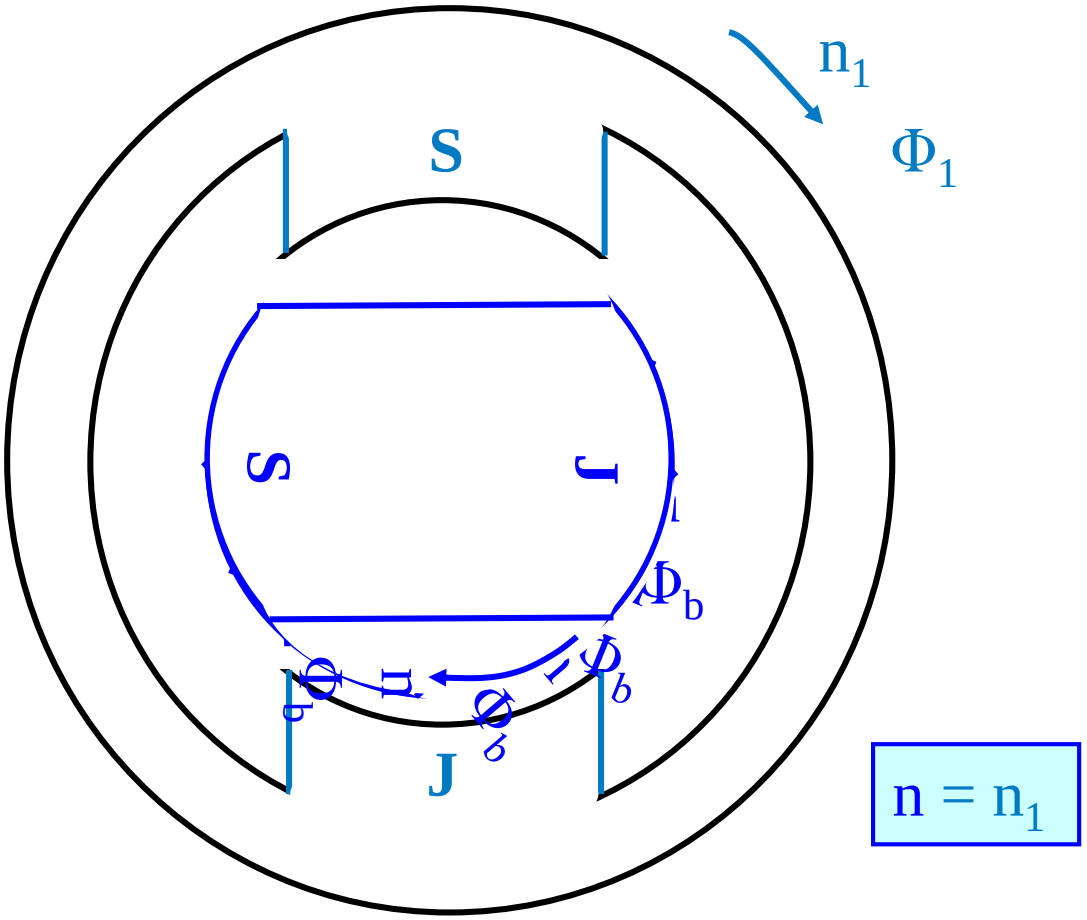
ZATĚŽOVÁNÍ SYNCHRONNÍHO ALTERNÁTORU

Chod naprázdno



ZATĚŽOVÁNÍ SYNCHRONNÍHO ALTERNÁTORU

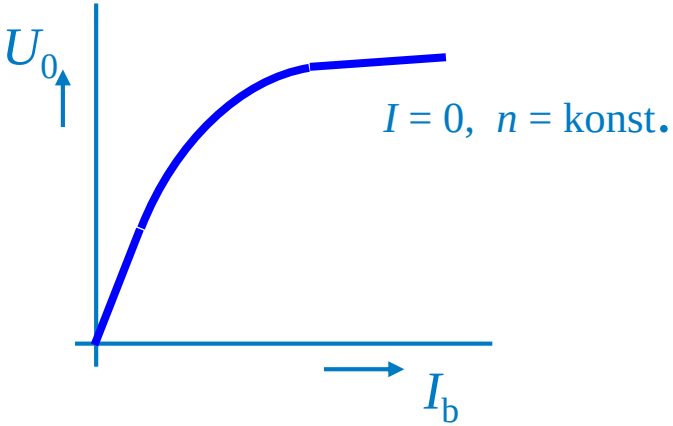
Nárůst poháněcího momentu M_p



.

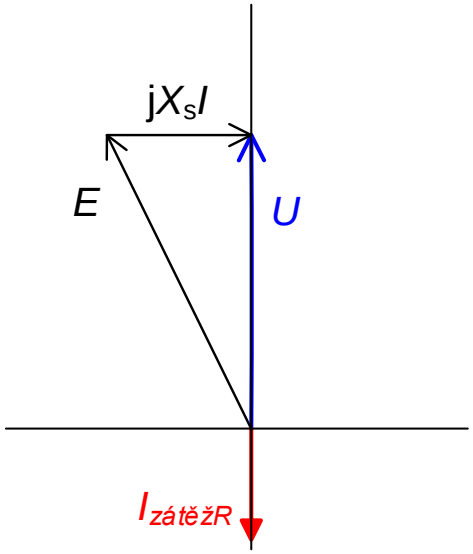
SAMOSTATNĚ PRACUJÍCÍ SYSGEN

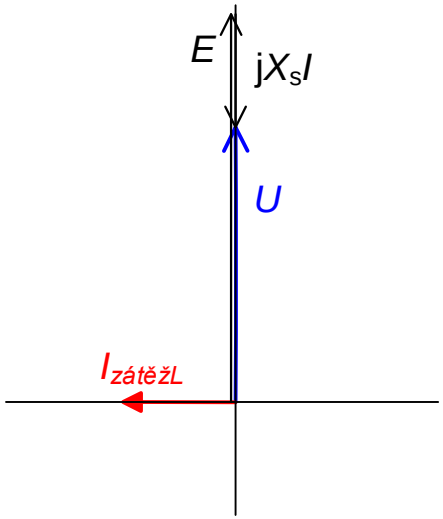
- ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA $U = f(I)$ pro I_b = konst a n = konst
  → E = konst a f_e = konst

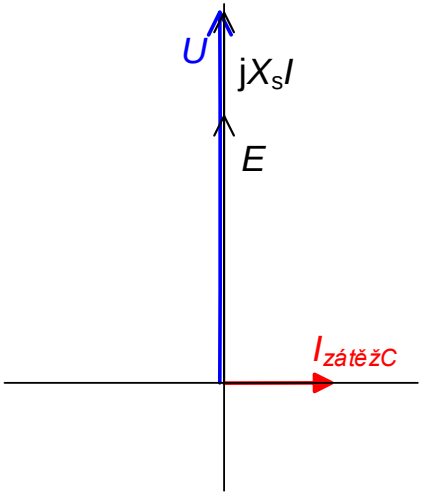


- Charakteristika naprázdno I_b → $U_{i0} = E = U_0$

- 3 ZÁKLADNÍ PŘÍPADY:

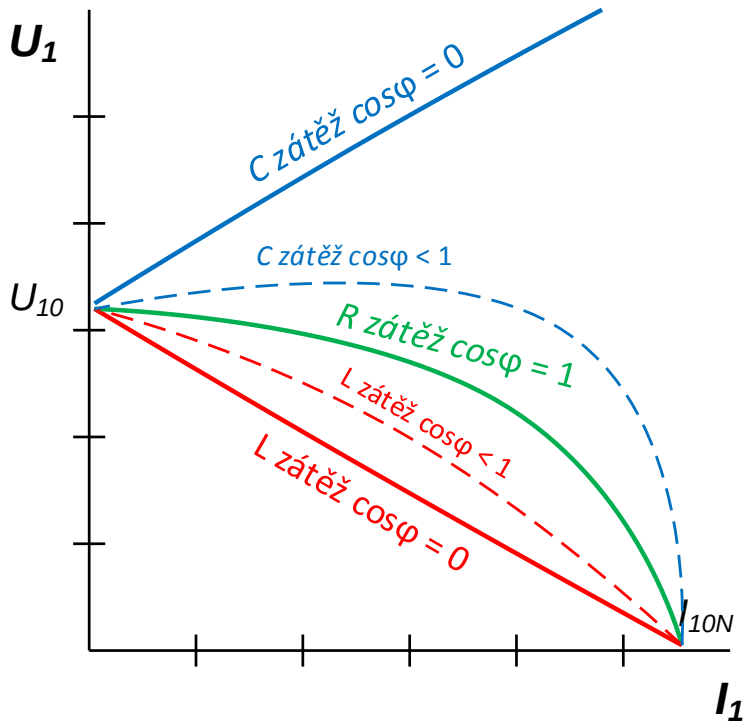






SAMOSTATNĚ PRACUJÍCÍ SYSGEN

- 3 ZÁKLADNÍ PŘÍPADY:
  - Čistě induktivní zátěž: $U = E - X_s I$ → svorkové napětí lineárně klesá se zatížením
  - Čistě kapacitní zátěž: $U = E + X_s I$ →svorkové napětí lineárně stoupá se zatížením
  - Čistě odporová zátěž: $(X_d I)^2 + U^2 = E^2$ →napětí na svorkách klesá po elipse



- Změna *U* závisí na charakteru zátěže a její velikosti:

  Kapacitní přibuzuje → napětí stoupá

  Induktivní odbuzuje → napětí klesá
- Zvýšení *M* na hřídeli → zvýší *n*, zvýší *f*, *U*, *I*, *P*
- Zvýšení I_b → zvýší *E*

SYNCHRONNÍ MOTOR

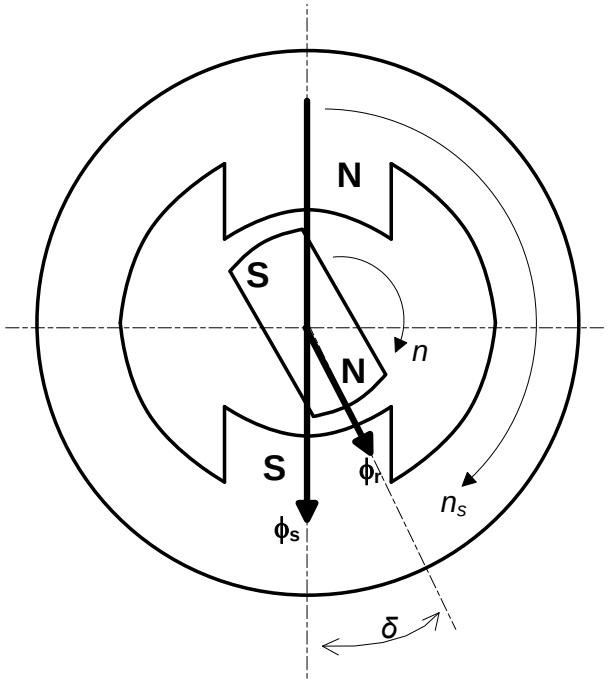
- Při napájení 3fázového statorového vinutí 3fázovým střídavým proudem:
  - úhlová rychlost fázoru napětí statoru $\omega_e = \omega_1 = 2\pi f_1$
  - úhlová rychlost točivého magnetického pole $\omega_m = \frac{\omega_e}{p} = \omega_s$

→ SYNCHRONNÍ RYCHLOST

- ROTOR vložený do točivého pole má svůj magnet

  → začne kopírovat rychlost točivého pole:

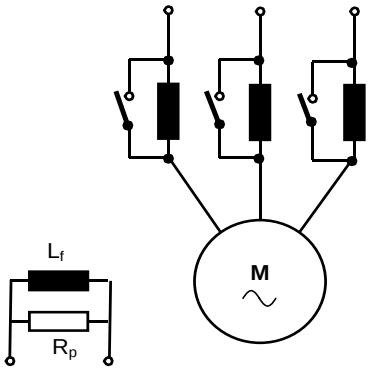
$$n_s = \frac{60 f_1}{p}$$



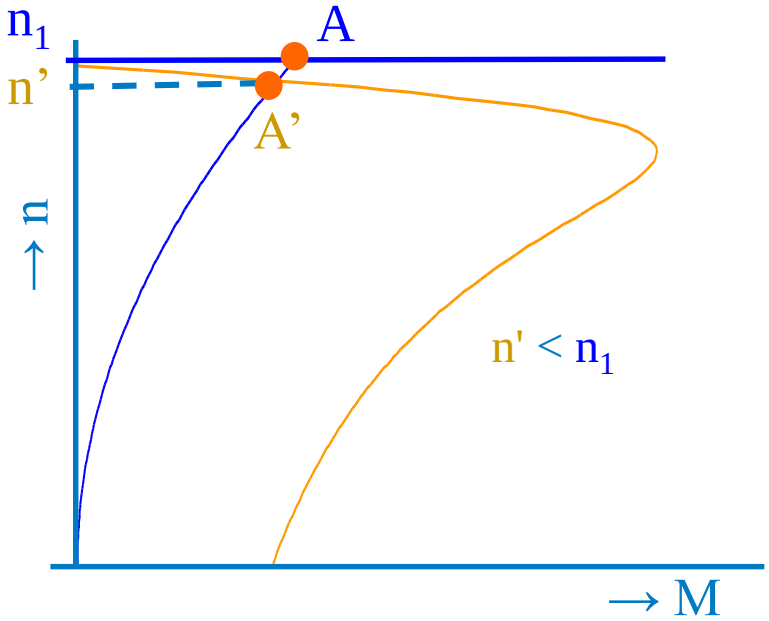
- Při f_1 = 50 Hz n_S = 3000, 1500, 1000 … 1/min
- Úhel δ se mění se zatížením (zátěžný úhel)

ROZBĚH SYNCHRONNÍHO MOTORU

- ASYNCHRONNÍ ROZBĚH používá AMORTIZAČNÍ VINUTÍ / TLUMIČ. Chová se jako speciální klecové vinutí. BUDICÍ VINUTÍ musí být buď zkratováno nebo připojeno přes externí odpor R_p.
  - Přímé připojení na síť
  - Připojení na síť přes tlumivku



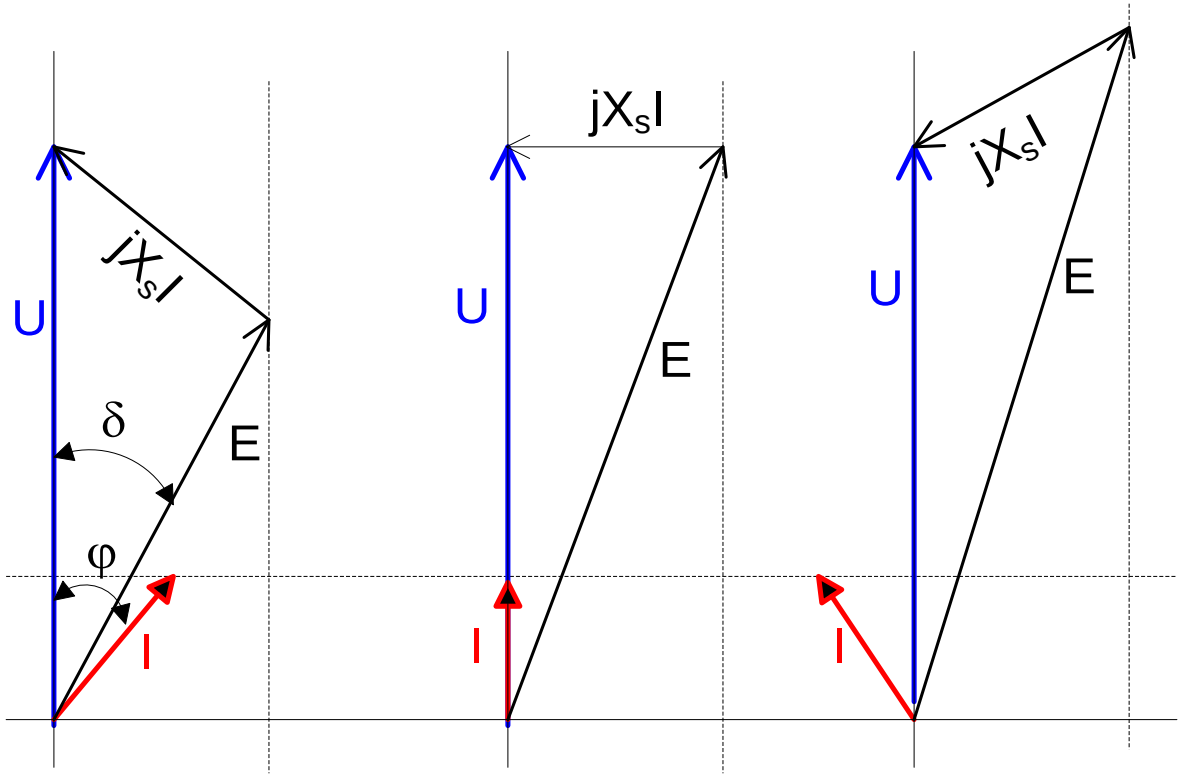
Tlumivka může být připojena i mezi fází a neutrálním bodem (při statorovém vinutí do hvězdy)



  - Připojení přes autotransformátor

- EXTERNÍM POHONEM (např. indukčním motorem s počtem pólpárů o jeden menším, než synchronní motor → to zajišťuje dosažení ω_s)
- PROMĚNNÝM KMITOČTEM viz řízení rychlosti

TURBOMOTOR NA TVRDÉ SÍTI

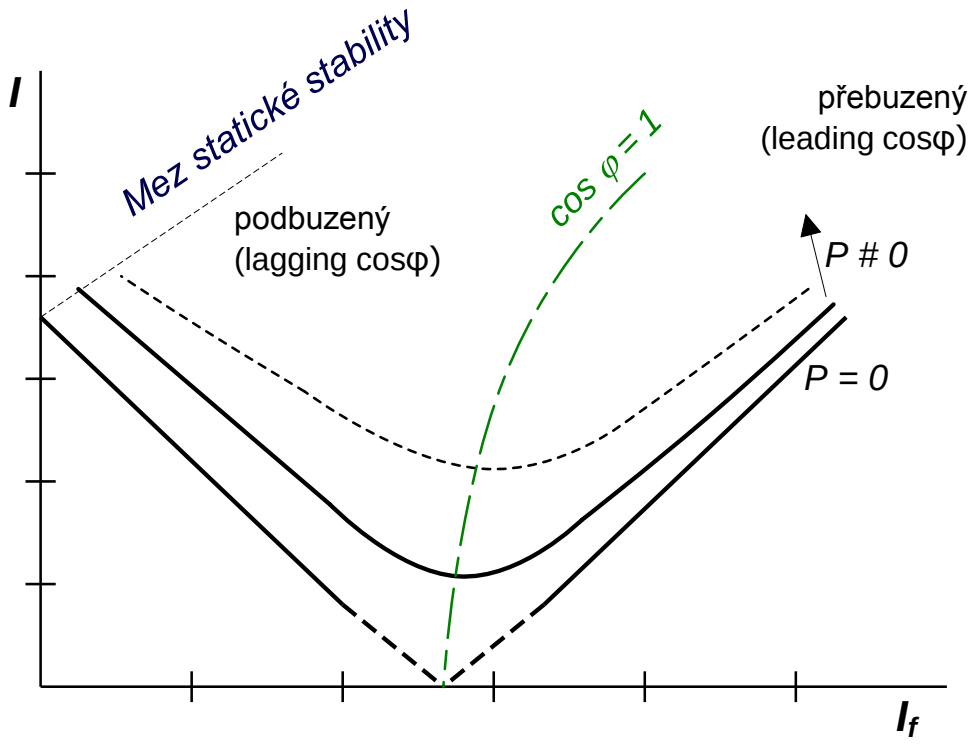


odebírá jalový proud (L)
Podbuzený

R zátěž

dodává jalový proud C
Přebuzený

„V“ KŘIVKY $I = f(I_f)$



Poznámka:

SYNCHRONÍ KOMPENZÁTOR = nezatížený přebuzený motor

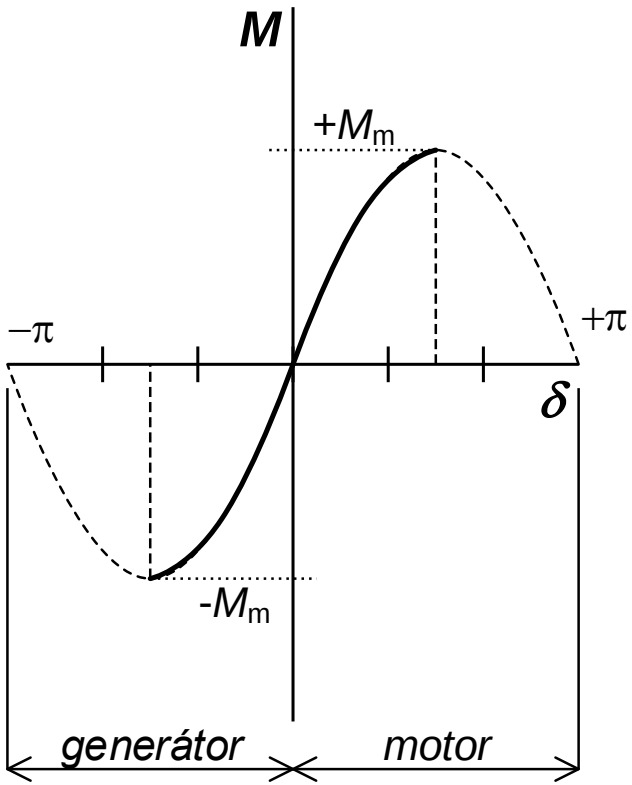
MOMENT TURBOMOTORU

- $P_m = 3UIcos\varphi = 3UI_w = M\omega_s$
- $X_s Icos\varphi = I_w X_s = Esin\delta$

$$M = \frac{3UE}{\omega_s X_s} sin\delta$$

- $M = M_{max} sin\delta$
- → $M = M_{max}$ pro $sin\delta = 90°$

  = mez statické stability

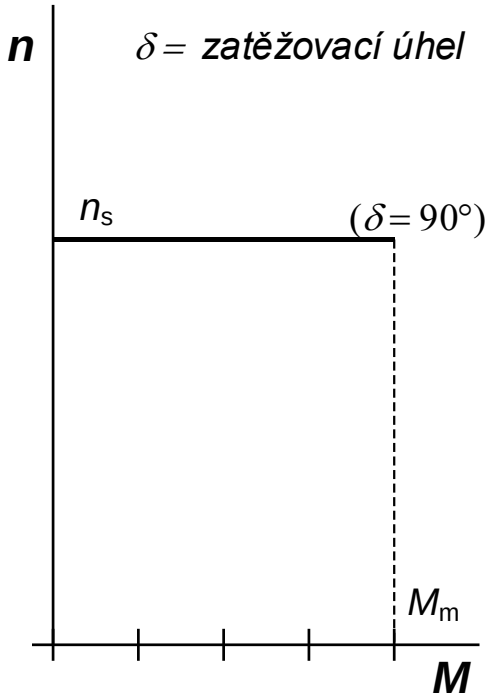


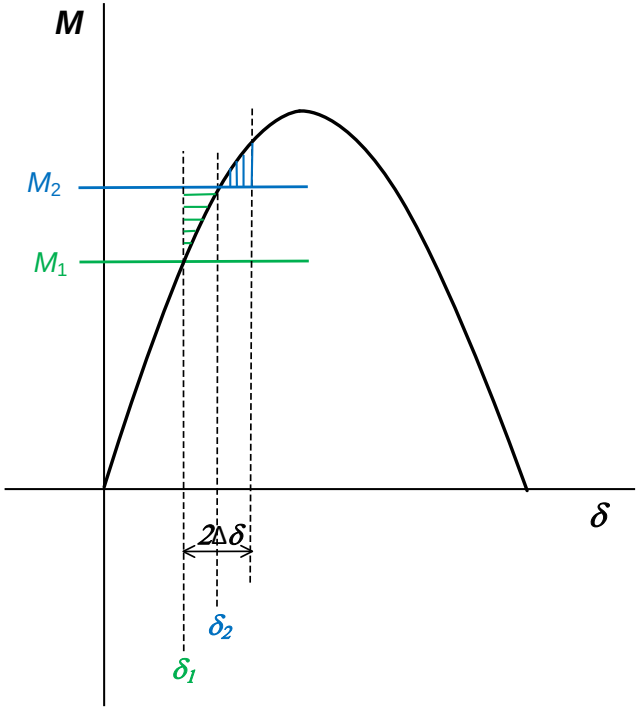
MAXIMÁLNÍ MOMENT LZE MĚNIT POUZE BUZENÍM

ZATĚŽOVÁNÍ A STABILITA

$$M = \frac{3UE}{X_s \omega_s} sin\delta$$

- ZATĚŽOVACÍ A MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA
- **STABILITA:** statická dynamická

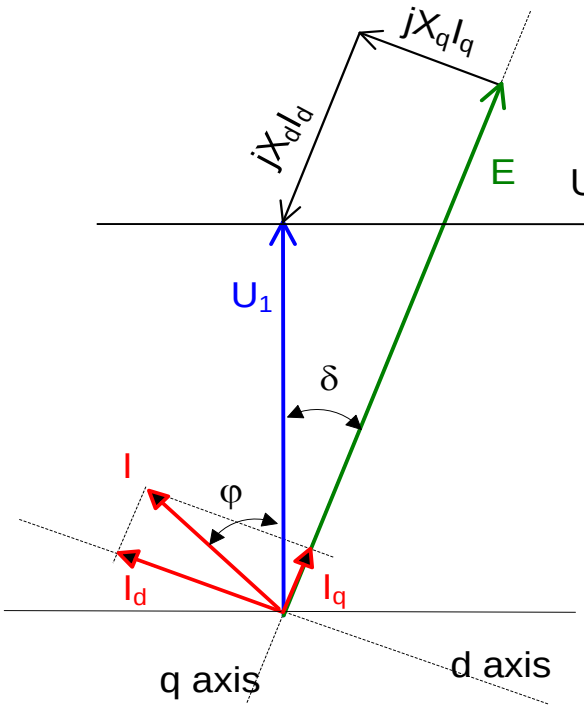




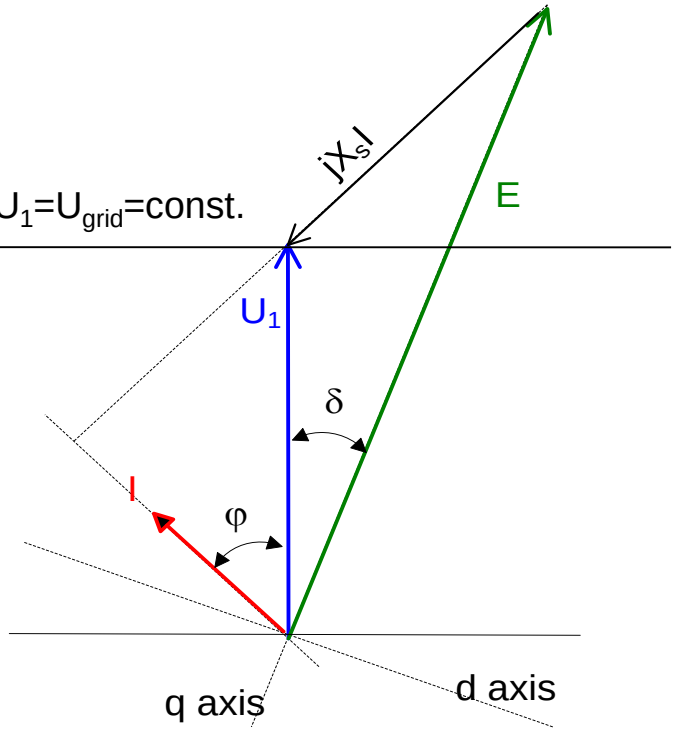
POROVNÁNÍ TURBO- A HYDRO- MOTOR

MOTOR NA TVRDÉ SÍTI → U_1 = konst., f_1 = konst.

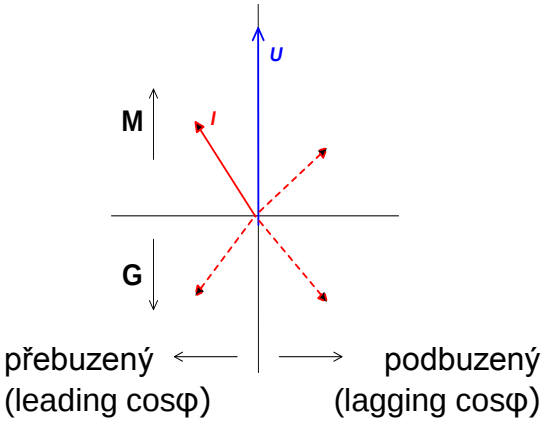
vyniklé póly



hladký rotor (se zjednodušením):



pracovní oblasti:

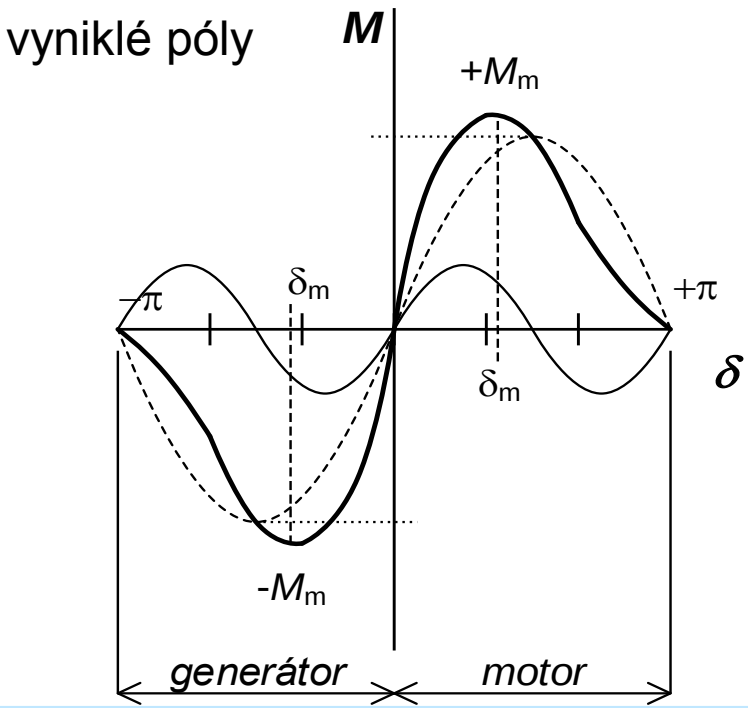


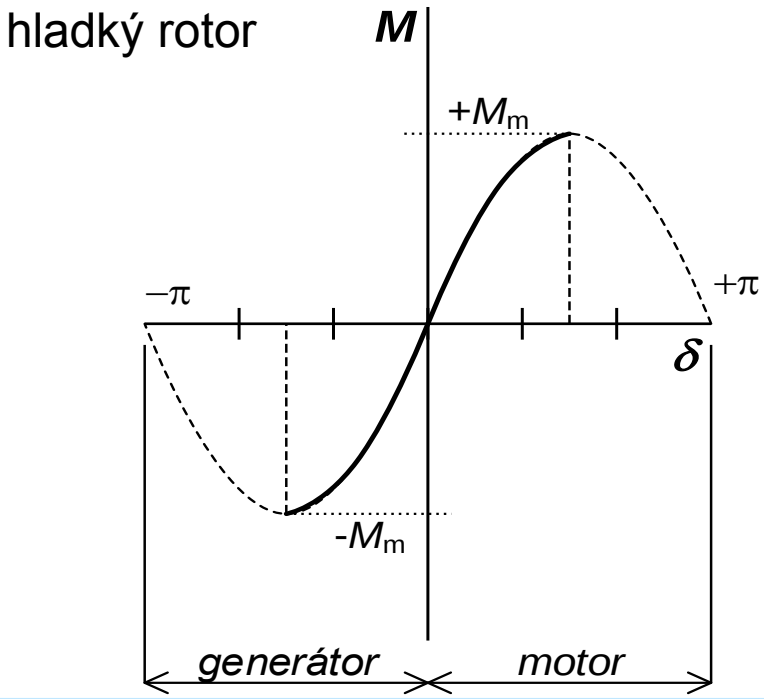
MOMENT HYDROSTROJE

$$M = \frac{3U_1E}{X_d\omega_m} sin\delta + \frac{3U_1^2}{2\omega_m} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_dX_q} \sin(2\delta) = M_{syn} + M_{relukt}$$

$$\omega_m = \omega_s$$

- Stroj s vyniklými póly může vytvářet moment i bez buzení = reluktanční motor
- U strojů s hladkým rotorem $X_d = X_q \rightarrow M_{reluct} = 0$





ŘÍZENÍ RYCHLOSTI

- Řízení rychlosti slouží hlavně pro udržování konstantní rychlosti a pro rozběh a brzdění / zastavení) motoru.

- Efektivní řízení rychlosti lze změnou statorového kmitočtu:
  (přepínání počtu pólů se nepoužívá)

$$\omega_m = \omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}$$

- Zdroje proměnného kmitočtu pro řízení rychlosti:
  - Synchronní generátor poháněný turbínou s proměnnou rychlostí (v elektrárnách)
  - Polovodičový měnič kmitočtu s napěťovým DC meziobvodem
  - Polovodičový měnič kmitočtu s proudovým DC meziobvodem (tzv. ventilový pohon, nejčastější použití)
  - Cyklokonvertor (polovodičový měnič kmitočtu bez DC meziobvodu)

REVERZACE, BRZDĚNÍ

Synchronní motory jsou přednostně používány jako jednosměrné stroje, dlouhodobě běžící konstantní rychlostí, resp. tam, kde tyto změny nejsou časté

- REVERZACE změnou směru točivého magnetického pole → změnou sledu fází (např. a,b,c → b,a,c)

- BRZDĚNÍ
  - Mohou být použity některé metody používané pro asynchronní stroje, například:
    - generátorický chod (odpojení od sítě a připojení na odporovou zátěž – budicím proudem se reguluje brzdný moment)
    - řízení rychlosti změnou statorového kmitočtu

BUDICÍ SYSTÉMY

- Funkce:
  - Zdroj regulovaného budicího proudu
  - Pomocné funkce při rozběhu, případně při brzdění

- Rozdíly v budicích systémech:
  - Typ zdroje proudu (DC rotační generátor – budič; řízený nebo neřízený usměrňovač)
  - Přenos budicí energie ze zdroje do budicího vinutí (kroužky, rotační transformátor, střídavý budič)
  - Řízení velikosti budicího proudu (proměnný odpor, elektronické spínací prvky - tyristory, tranzistory atd.)
  - Schopnost dodávat budicí proud také při stojícím stroji

- Dimenzování: musí být schopen dodávat $I_{fmax} \geq 1{,}4\ I_{fn}$ po dobu 60s

RELUKTANČNÍ MOTOR

PRO MENŠÍ SYNCHRONNÍ POHONY – příklad HODINY, PRAČKY, …

Magnetická nesymetrie v osách *d* a *q* = tvar momentové charakteristiky je podobný momentové charakteristice stroje s vyniklými póly (poměr X_d/X_q = 5 až 10)

- nemá buzení → E = 0 → moment pouze reluktanční

$$M = \frac{3U_1^2}{2\omega_m} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cdot \sin(2\delta)$$

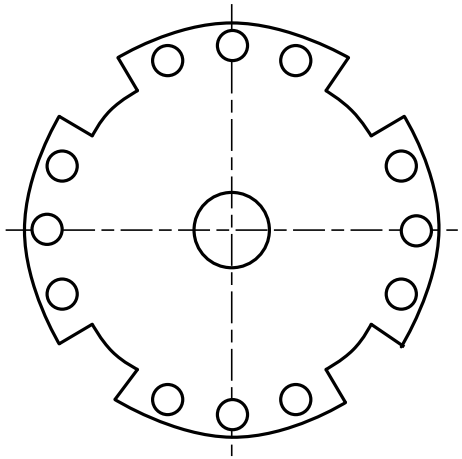
- **ZÁKLADNÍ DRUHY:**
  - Synchronní reluktanční motor
  - Spínaný reluktanční motor (switched reluctance motor) – speciální elektronika, rozdílný počet pólů statoru a rotoru
  - Krokový reluktanční motor
- **Výhoda** – může mít poměrně velký výkon při nízké ceně
- **Nevýhoda** – kolísání momentu při nízkých otáčkách

ČINNOST RELUKTANČNÍCH MOTORŮ

- **SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ MOTOR**
  - **STATOR** – magneticky měkký materiál (plechy), trojfázové vinutí
  - **ROTOR** – stejný počet pólů jako stator (4 až 6), bez vinutí

  Žádné vodivé části na rotoru, ω_s, minimální ΔP_2

  Regulace rychlosti frekvenčními měniči

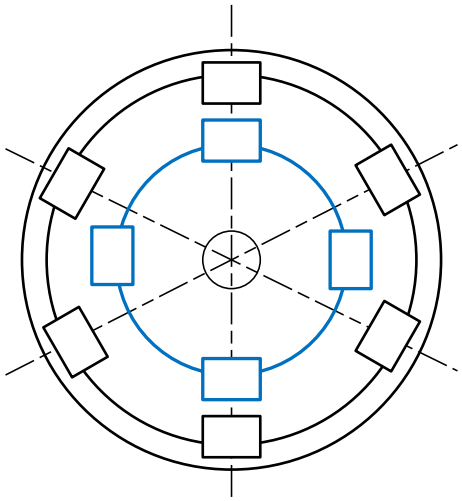


- **SPÍNANÝ RELUKTANČNÍ MOTOR**
  - **STATOR** – magneticky měkký materiál (plechy), vyniklé póly, napájené vinutí
  - **ROTOR** – obdoba statoru, bez vinutí, $2p_{rotor} < 2p_{stator}$

  Pro zastavení v určité pozici

  Pro prostory s nebezpečím výbuchu (doly)

  Řízení frekvenčním měničem



KROKOVÝ MOTOR

- PŘEVÁDÍ NAPÁJECÍ IMPULSY NA POSTUPNÉ OTÁČENÍ HŘÍDELE
- PRO PŘESNÉ NASTAVENÍ POLOHY BEZ ZPĚTNÉ VAZBY
- VĚTŠINOU POHONY MALÝCH VÝKONŮ
- POHYB NENÍ PLYNULÝ → **KROKY**
- POČET KROKŮ / OTÁČKU: počet pólů, způsob řízení

- **STATOR**:

  Póly buzené stejnosměrnými pulsy

- **ROTOR** – stejný počet pólů jako stator:

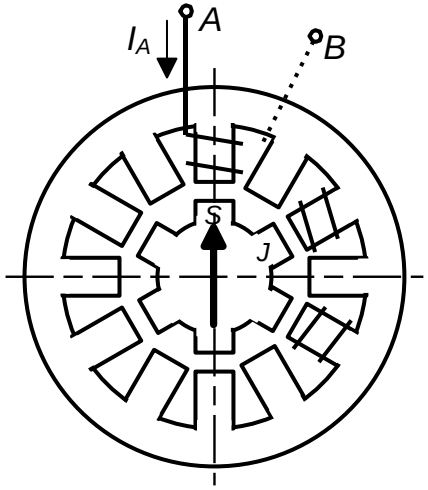
  Pasivní (VRM = Variable Reluctance Motor) – nerovnoměrná vzduchová mezera (synchronní reluktanční stroj)

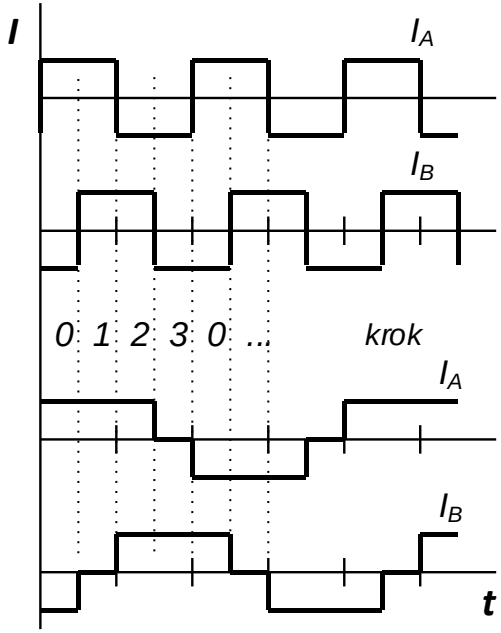
  Aktivní (PM = Permanent Magnet motor) – permanentní magnet (vinutí napájené DC je nevýhodné)

ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORU

Různé napájení vinutí (cívek)

UNIPOLÁRNÍ :
v každém okamžiku napájena jen jedna
BIPOLÁRNÍ :
napájené dvě protilehlé cívky současně



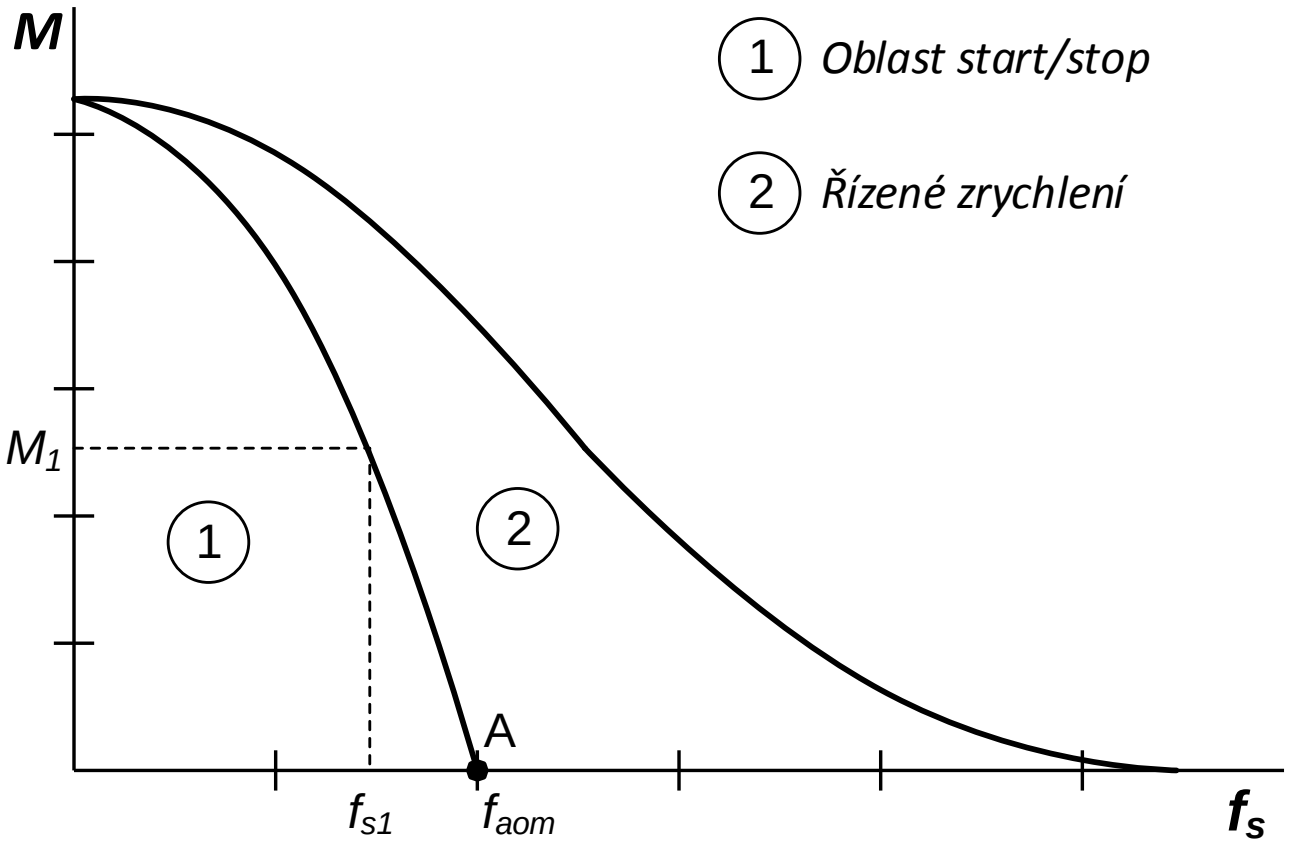


JEDNOFÁZOVÉ (jedna cívka unipolární nebo bipolární)
DVOUFÁZOVÉ (dvě sousední cívky)

S PLNÝM KROKEM – tolik kroků, kolik pólů
S POLOVIČNÍM KROKEM – dvojnásobná přesnost = střídání jedno- a dvoufázového řízení

MOMENT KROKOVÉHO MOTORU

úhel kroku: $\alpha = \frac{360°}{Nmp}$, kde N = počet zubů, m = počet fází statoru, p=počet pólů



VÝHODY A NEVÝHODY KROKOVÉHO MOTORU

- **HLAVNÍ VÝHODY**
  - Jednoduché řízení, bezkartáčový, bezúdržbový
  - Moment i při nulových otáčkách
  - Otáčí se oběma směry
  - Nepotřebuje zpětnou vazbu (žádná úhlová chyba, která by se kumulovala)

- **HLAVNÍ NEVÝHODY**
  - Není informace o skutečné poloze
  - Při přetížení ztratí pozici (krok) bez varování
  - Limitovaná dynamika
  - Měkká momentová charakteristika (ztrácí M, při vyšších n)
  - Poměrně hlučný