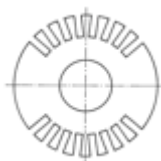


Meranie reaktancií synchronného alternátora

Špes Michal · Elektrotechnika

11.04.2016



Článok spracúva problematiku synchronných alternátorov, konkrétne určenie synchronných reaktancií podľa normy ČSN EN 60034-4 ed.2. V tomto článku je detailne zachytená metóda merania spolu s postupmi pre vykonanie jednotlivých meraní. Následne je opísaná aj metóda spracovania výsledkov spolu s vyhodnotením podľa normy ČSN EN

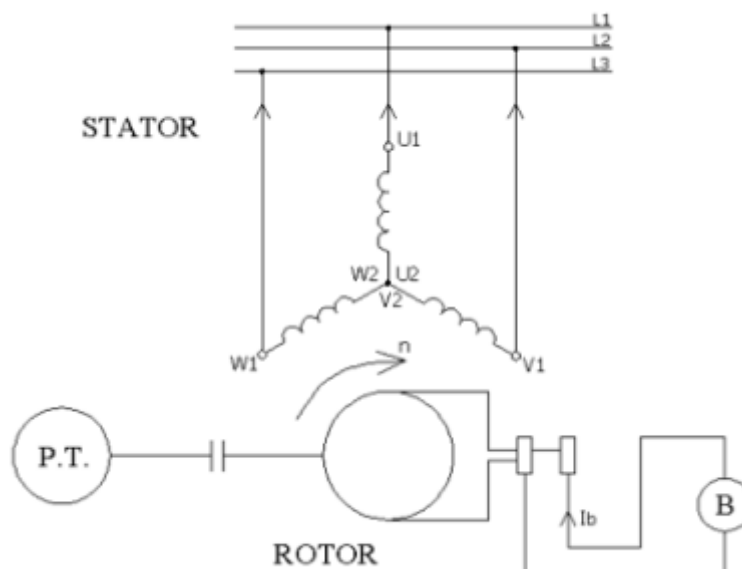
60034-4 ed.2

Úvod

Elektrizačná sústava patrí medzi časť energetickej sústavy a zahŕňa všetky silnoprádové zariadenia slúžiace na premenu mechanickej energie más na energiu elektrickú, na jej prenos až po jednotlivé spotrebiče. Neodmysliteľnou súčasťou tejto sústavy sú generátory, ktorých vlastnosti popisujú reaktancie ako napríklad: synchronná reaktancia v pozdĺžnej osi, synchronná reaktancia v priečnej osi prípadne rázové a prechodné reaktancie. Nutnosť poznať alebo vedieť určiť hodnoty týchto reaktancií je prinajmenšom z dôvodu chránenia generátorov. Ako príklad nám slúži ochranná funkcia synchronných generátorov ANSI 40: Ochrana pri strate budenia synchronného generátora. Parametrizácia a nastavenie tejto ochrannej funkcie je možné len na základe týchto synchronných reaktancií.

1. Synchronné alternátory

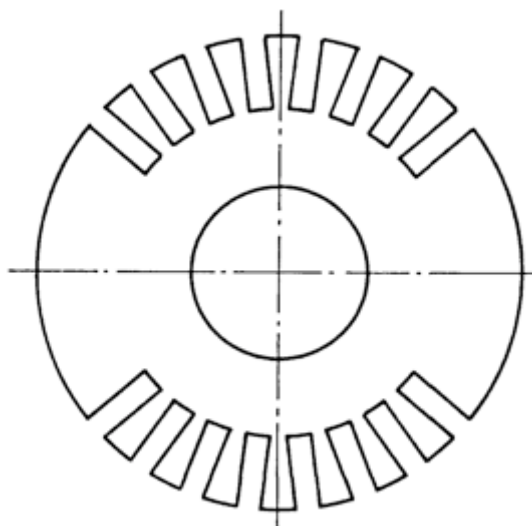
Synchronné generátory sú točivé elektrické stroje, ktoré pri svojej činnosti premieňajú energiu rotujúcich más na energiu elektrickú. Celý tento proces je podmienený vytvorením premenlivého rotorového magnetického poľa budiacim prúdom, ktorý je privedený na rotorové vinutie [1]. Z pohľadu regulácie napätia majú tieto stroje voči asynchronným generátorom značnú výhodu. Veľkosť svorkového napätia je priamo úmerná miere prebudenia generátora budiacim prúdom. Pri zvýšení budiaceho prúdu dochádza k nárastu svorkového napätia generátora. V prípade zníženia veľkosti budiaceho prúdu je efekt opačný [1].



Obr.1 Principiálna schéma synchronného generátora [1]

1.1 Turboalternátory

V elektrizačnej sústave rozoznávame dva druhy synchronných generátorov resp. synchronných alternátorov. Prvú skupinu tvoria turboalternátory. Tie majú označenie aj synchronné alternátory s hladkým rotorom. Ich využitie je v elektrárnach, ktorých turbína využíva ako hnacie médium paru. Ich rýchlosť je daná počtom pólových dvojíc [2].



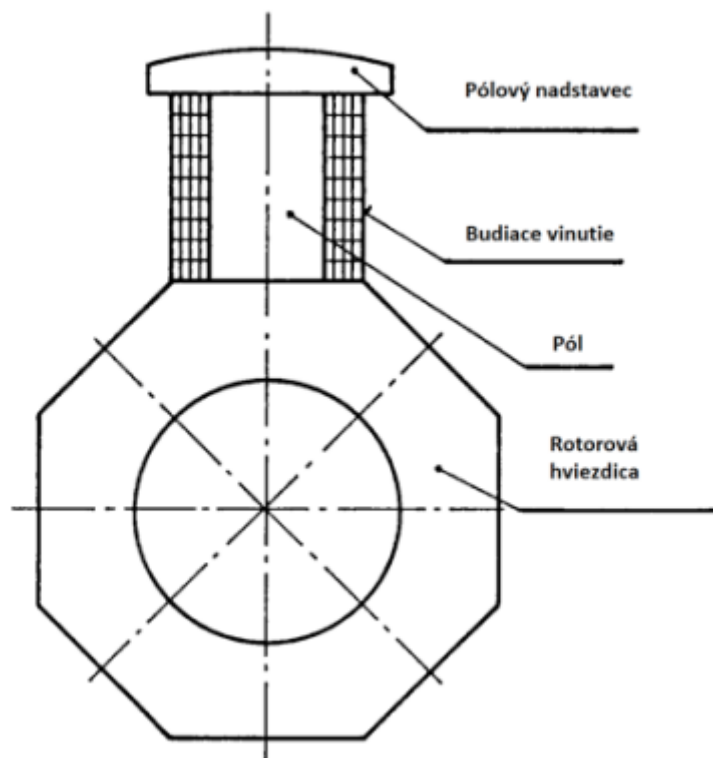
Obr.2 Rez alternátora s hladkým rotorom [2]

Pre tieto synchronné stroje platí konštantnosť vzduchovej medzery po celom obvode uloženia rotora v konštrukcii. Na základe tejto skutočnosti je možné povedať, že reaktancia v pozdĺžnej osi je rovná reaktancii v priečnej osi, teda platí: $X_d = X_q$ [2].

1.2 Hydroalternátory

Druhu skupinu synchronných strojov tvoria hydroalternátory. Rýchlosť otáčania rotora ich radí medzi pomalobežné stroje. Ako je zrejmé už z ich názvu pre hnacie médium

turbíny je využívaná voda a teda ich inštalácia a využitie je pri vodných elektrárnach [2]. Ich rotor je vo väčšine prípadov s vysunutými pólovými nadstavcami. V týchto nadstavcoch je uložené budiace vinutie s podmienkou zachovania rovnomernosti uloženia po celom obvode rotora [2]. Z pohľadu reaktancií tu dochádza k istej odlišnosti oproti turboalternátorom. Pre hydroalternátory platí nerovnomernosť vzduchové medzery medzi uložením rotora a statorového vinutia. V pozdĺžnej osi je vzduchová medzera minimálna, no magnetická vodivosť cesty magnetického toku je maximálna na rozdiel od magnetickej vodivosti v priečnej osi a teda platí: $X_d > X_q$ [2].



Obr.3 Rez a konštrukcia alternátora s hladkým rotorom [2]

1.3 Budiace súpravy

Budiaca súprava predstavuje zdroj jednosmerného prúdu pre vybudenie magnetického poľa rotora regulovaného v uzavretej slučke. Budiacu súpravu tvorí [2]:

- Budič
- Regulátor budenia
- Odbudzovač
- Prvky pre meranie
- Ovládacie prvky

V závislosti od zdroja energie pre budič rozlišujeme závislú a nezávislú budiacu súpravu. Závislá budiaca súprava vyžaduje pripojenie do siete pre odber budiacej energie pre svoju činnosť. O nezávislej budiacej sústave hovoríme vtedy, ak zdroj budiacej energie nie je bezprostredne závislý na stave striedavej siete do ktorej generátor pracuje [2].

2. Skúška synchronného alternátora naprázdno

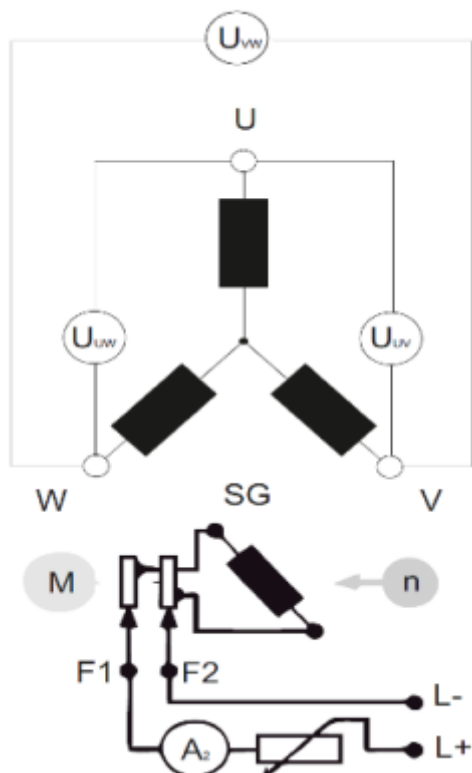
Demonštračne zariadenie Katedry elektroenergetiky FEI-TUKE tvorí synchronný alternátor s nasledujúcimi štítkovými údajmi (Tab. 1).

Tab.1 Parametre synchronného generátora DZ

P_N [kW]	3,2
S_N [kVA]	4
cosφ_N	0,8
n[ot./min.]	3000
f[Hz]	50
U_N[V]	400
I_N[A]	5,77

Chod generátora naprázdno je definovaný ako ustálený chod generátora bez zaťaženia a teda satorovým vinutím neprechádza žiaden prúd [3]. Pri skúške synchronného generátora naprázdno je uprednostňovaný chod stroja v generátorovom chode. Motorický chod pre skúšku synchronného stroja volíme v niektorých prípadoch len pre generátory malých alebo stredných výkonov [3]. Skúšku synchronných motorov naprázdno sú častokrát vykonané v generátorovom režime. Pri skúške synchronného generátora naprázdno určujeme závislosť svorkového napätia generátora od veľkosti budiaceho prúdu [3].

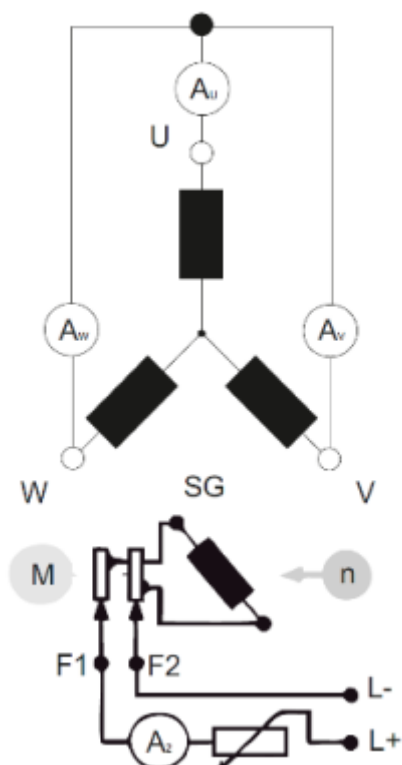
Samotnej skúške synchronného generátora predchádza kontrola mechanických častí, konkrétne mechanickej spojky stroja a pohonu. Následne vykonáme zapojenie podľa schémy merania (Obr. 4). Vinutie generátora býva často spojené do hviezdy s vyvedeným nulovým bodom. Pripojenými voltmetrami meriame združené napätia medzi jednotlivými fázami. Norma ČSN EN 60034-4 ed.2 odporúča interval 0,2 až 1,3 násobok menovitej hodnoty napätia U_N. V prípade uvedeného merania to znamená nabudenie generátora na 0,2 násobok menovitého napätia U_N. Následne zvyšujeme napätie budiacim prúdom až po hodnotu 1,3 násobok menovitého napätia U_N a zaznamenávame veľkosť svorkového napätia od veľkosti budiaceho prúdu. Pre korektnosť výsledkov uvedeného merania je nutné roztočiť generátor pohonom na menovité otáčky, čo v prípade Demonštračného zariadenia Katedry elektroenergetiky znamenalo dosiahnuť synchronnú rýchlosť otáčania 3000 ot/min .



Obr.4 Schéma zapojenia pre skúšku synchronného generátora naprázdno

3. Skúška synchronného alternátora naprázdno

Pri skúške synchronného generátora nakrátko je úvodný priebeh merania totožný s predchádzajúcim. Po kontrole mechanickej spojky vykonáme zapojenie podľa príslušnej schémy (Obr. 5) [3].

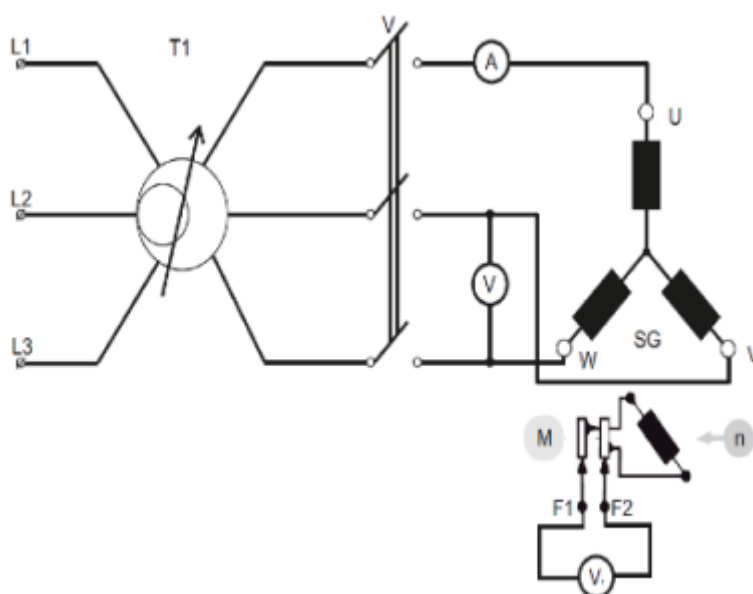


Obr.5 Schéma zapojenia pre skúšku synchronného generátora nakrátko

Synchrónny generátor následne roztočíme na menovité otáčky. Následne prevedieme spojenie nakrátko pričom musíme dbať na to aby bol generátor budený až po prevedení spomínaného spojenia. Následne budíme generátor prúdom I_b a meriame veľkosť skratového prúdu I_k ako závislosť $I_k(I_b)$ [3].

4. Skúška synchrónneho alternátora naprázdno

Tak ako bolo spomenuté v predchádzajúcej časti tohto článku synchrónna pozdĺžna reaktancia X_d je rovná synchrónnej priečnej reaktancii X_q . Pre dvoj pólové stroje to nie úplne presne [2]. V prípade strojov s vyjadrenými pólmi je reaktancia v pozdĺžnej osi X_d väčšia ako reaktancia v priečnej osi X_q . Pre moderné elektrické stroje býva veľkosť reaktancie v priečnej osi rovná 0,7 až 0,75 násobku synchrónnej reaktancie v pozdĺžnej osi [3]. Jednou z možností určenia hodnoty tejto reaktancie je skúška synchrónneho generátora sklzovou metódou.



Obr.6 Schéma merania pre skúšku synchrónneho generátora sklzovou metódou

Pri tomto meraní nenabudený rotor skúšaného generátora rozbehneme pohonom na podsynchronne otáčky. Statorové vinutie synchrónneho generátora napájame trojfázovým autotransformátorom zníženým napätím. Literatúra uvádza zníženú hodnotu napätia v rozmedzí 0,1 až 0,25 násobok menovitého napätia U_N . Každopádne je nutné sledovať na voltmetri kolísanie napätia. V prípade, že máme dostatočne tvrdý napäťový zdroj napájame statorové vinutie synchrónneho generátora o niečo vyšším napätím ako je spomínaný interval privádzaného napätia. Okrem iného je nutné kontrolovať prúd pretekajúci statorovým vinutím, ktorý nesmie presiahnuť hodnotu 0,7 až 0,8 násobok menovitého prúdu generátora I_N [3].

Keď je reluktancia obvodu (magnetický odpor) najväčšia, prechádza magnetický tok striedavého vinutia priečnou polohou rotora a nameriame X_q pri najväčšom prúde I_{MAX} [3]. Pri tomto meraní sa odporúča vykonať viacero meraní pri rôznych hodnotách napájacieho napätia a výslednú hodnotu reaktancie určíme ako priemer z vypočítaných hodnôt [3].



Obr.7 Detail zapojenia pre skúšku synchronného generátora sklzovou metódou

5. Vyhodnotenie skúšok naprázdno a nakrátko

Pre vyhodnotenie merania je nutné určiť zo skúšky naprázdno a nameraných združených hodnôt napätia medzi jednotlivými fázami priemernú hodnotu napätia podľa nasledujúcej rovnice:

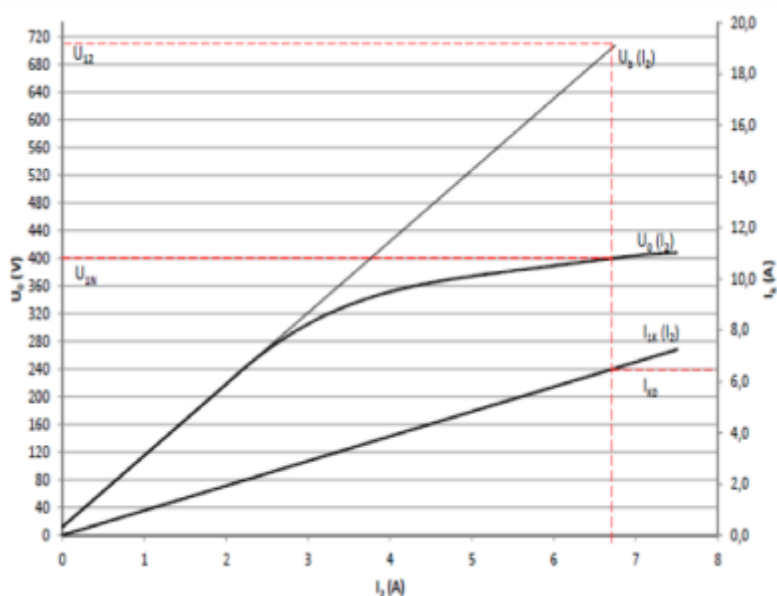
$$\bar{U} = \frac{U_{UV} + U_{VW} + U_{UW}}{3} \quad (1)$$

Rovnako aj pre skratové prúdy získane meraním nakrátko určíme priemernú hodnotu:

$$\bar{I}_L = \frac{I_{3k-L1} + I_{3k-L2} + I_{3k-L3}}{3} \quad (2)$$

Po vypočítaní potrebných parametrov môžeme vytvoriť výslednú charakteristiku ako [3]:

- Závislosť napätia U_0 na veľkosti budiaceho prúdu I_b
- Závislosť skratového prúdu I_k na veľkosti budiaceho prúdu I_b



Obr.8 Charakteristika synchronného generátora zo skúšky naprázdno a nakrátko

Na základe tejto charakteristiky môžeme určiť synchronnú reaktanciu v pozdĺžnej osi X_d dosadením do nasledujúcej rovnice [3]:

$$X_d = \frac{U_{12}}{\sqrt{3}I_{K0}} = \frac{700}{\sqrt{3} \cdot 6,4} = 63,148\Omega \quad (3)$$

Pre učenie synchronnej reaktancie v pomerných jednotkách resp. v percentách využijeme nasledujúcu rovnicu z ktorej si odvodíme výslednú rovnicu pre konečný výpočet:

$$X_d = \frac{x_d\%}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} \quad (4)$$

A teda výsledná hodnota synchronnej reaktancie v percentách je:

$$x_d\% = \frac{X_d \cdot 100 \cdot S_n}{U^2} = \frac{63,148 \cdot 100 \cdot 0,004}{0,4^2} = 157,8\% \quad (5)$$

6. Vyhodnotenie skúšky sklzovou metódou

Určenie synchronnej reaktancie v priečnej osi je o niečo jednoduchšie oproti skúške synchronného generátora naprázdno a nakrátko. Pre vyhodnotenie tohto merania norma ČSN EN 60034-4 ed.2 definuje určenie synchronnej reaktancie v priečnej osi X_q podľa nasledujúcej rovnice [3]:

$$x_d\% = \frac{X_d \cdot 100 \cdot S_n}{U^2} = \frac{63,148 \cdot 100 \cdot 0,004}{0,4^2} = 157,8\% \quad (5)$$

$$X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3} \cdot I_{max}} \quad (6)$$

Reaktancia v priečnej osi X_q vyjadrenú v percentuálnych jednotkách určíme na základe nasledujúcej rovnice:

$$x_q\% = \frac{X_q \cdot 100 \cdot S_n}{U^2} \quad (1)$$

Tab.2 Prehľad nameraných údajov zo skúšky sklzovou metódou

U_{\min} [V]	I_{\max} [A]	X_q [Ω]
270	3,9	39,970
295	4,6	37,026

V závere je nám zostáva určiť priemernú hodnotu reaktancie v priečnej osi, ktorá je $X_q = 38,498 \Omega$ resp. $x_{q\%} = 96,245\%$.

7. Záver

Tento článok sa zaoberá meraním synchrónnych reaktancií synchrónneho generátora Katedry elektroenergetiky, ktorý je časťou Demonštračného zariadenia KEE. V článku je čo do rozsahu možné spracovaná problematika synchrónnych generátorov, či už sa jedná o turboalternátory alebo hydroalternátory. Generátory ako zdroje elektrickej energie tvoria neodmysliteľnú časť elektrizačnej sústavy. V tomto dôsledku je nutné poznať ich elektrické veličiny. Tie môžu byť známe alebo ich je nutné určiť meraním. V tomto článku je popísaná teória určenia synchrónnych reaktancií meraním a metóda spracovania a vyhodnotenia výsledkov podľa normy ČSN EN 60034-4 ed. 2 na reálnom generátorovom sústrojenstve Katedry elektroenergetiky.

Zoznam použitej literatúry

1. SPŠE K. ADLERA 5, Bratislava: Silnoprúdové zariadenia, STN EN 13201-1. Osvetlenie pozemných komunikácií: Výber tried osvetlenia. 2005 [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné na internete: <http://siz.q-azy.sk/es/es52.html>
2. Katedra elektrických pohonů, Praha, ČVUT: Synchronní stroje [online]. [cit. 2016-0-01]. Dostupné na internete: <http://oldmotor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1B14SP1/EMM-p-5-101-130—SY.doc>
3. ČSN EN 60034-4:2008 : Točivé elektrické stroje – Časť 4: Metody určování veličín synchronního stroje ze zkoušek.

Spoluautormi článku sú doc. Ing. Lubomír Beňa, PhD., Ing. Miroslav Mikita, Ing. Martin Vojtek, Katedra elektroenergetiky, FEI TUKE, Slovenská republika; Bc. Michal Márton, Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií FEI TUKE, Slovenská republika; Ing. Ivana Sulírová, Katedra priemyselného inžinierstva Sjf UNIZA, Slovenská republika