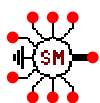


5. Elektrické stroje točivé

Modelováním točivých strojů se dají simulovat elektromechanické přechodné děje v elektrizačních soustavách. Sem patří problematika stability, ostrovní provoz, nebo jen rozběhy motorů apod. ATP má k dispozici jednak model synchronního stroje SM59 a model univerzálního motoru UM.

5.1 SM59

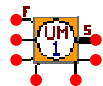
Pro stroj s konstantním buzením a mechanickým momentem se použije neřízený model, jinak model řízený pomocí osmi in/out signálů TACS. Neřízený model má pouze třífázový vývod z kotvy.



Model neobsahuje saturaci a počítá s jednou hmotností na hřídeli (v ATP je možnost brát více hmotností). Zadávat se elektrické a mechanické parametry stroje. Požadované veličiny jsou dobře popsány v helpu. Každý z vývodů pro řízení umožňuje volbu typu mezi 0 a 22. Help rovněž popisuje, jde-li o vstupní nebo výstupní signál a co definuje. Nula ignoruje signál, typ 15 není použit a zbývající do 20 jsou různé výstupní proměnné. Typ 21 pak slouží pro řízení buzení a 22 pro řízení mechanického výkonu.

5.2 UM

Verze 3 ATPDraw poskytuje volbu 5 typů, program ATP jich zná 12. UM1 je model třífázového synchronního stroje, UM3 stroj indukční klecový a UM4 kroužkový, UM6 je stroj jednofázový a pátý UM8 stejnosměrný.



V ATPDraw se jednotlivé požadované hodnoty zadávají v dialogovém okně a jejich význam je popsán v helpu. Navíc se pro univerzální stroje v každém jednotlivém datovém souboru volí společně způsob iniciace, použitý systém jednotek a vzájemné propojení strojů prostřednictvím volby **ATP Settings Switch/UM**.

5.3 Motorgenerátor

Způsob práce s modelem UM ukazuje příklad publikovaný na EMTP Summer Course roku 1989 v Leuven: J.A. Martinez: Simulation of a three-phase synchronous motor-generator using the U. M. code.

UM model synchronního stroje umožňuje sestavit obvod se stroji různé frekvence, zatímco SM59 zadává tutéž frekvenci pro každý stroj. Mechanickou vazbu mezi stroji lze realizovat dvěma způsoby. Přímé propojení je vhodné pro malou mechanickou soustavu dvou nebo tří strojů. Druhý způsob řeší mechanickou soustavu každé hřídele zvlášť a vzájemná vazba se uskutečňuje pomocí TACS. V příkladu bude použit pouze první způsob.

5.3.1 Parametry obvodu modelu UM

Elektrická síť má amplitudu 9,8 kV a frekvenci 50 Hz, její ekvivalentní impedance je 0,25 Ω a 3,5 mH. Nastavení UM v ATP je: automatická iniciace, jednotky SI a propojení má volbu prediction. Pro iniciaci

generátoru je volena maximální hodnota 9,4 kV a ekvivalent mechanické zátěže 5Ω a 4,5 mH. Pomocí rovnic obvodu byla vypočtena hodnota iniciačního napětí pro motor: 9,444 kV a $-9,4^\circ$. Následující tabulka uvádí hodnoty obou strojů.

rozdílné parametry

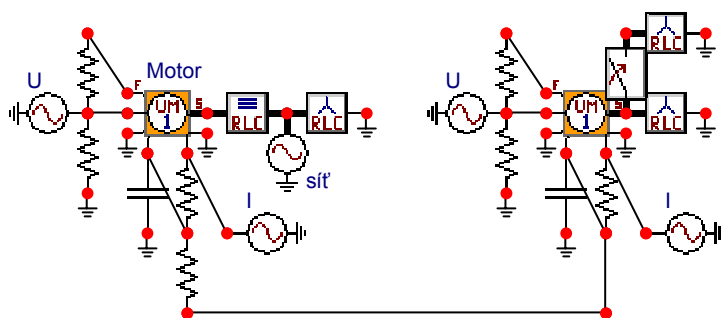
	jednotka	MOTOR	GENERÁTOR
výkon	MV·A	50	45
napětí statoru	kV	12	12
frekvence	Hz	50	100
počet pólů	-	6	12

společné parametry (poměrné hodnoty)

podélná reaktance	x_d	1,05	1,12
příčná reaktance	x_q	0,80	0,90
transitní reaktance	x_d'	0,25	0,30
subtransitní podélná reaktance	x_d''	0,16	0,20
subtransitní příčná reaktance	x_q''	0,22	0,24
rozptylová reaktance kotvy	x_l	0,15	0,18
odpor statoru	r	0,005	0,008

společné parametry-časové konstanty (čas v sekundách)

momentu setrvačnosti	H	1,10	1,20
podélná transitní naprzdno	τ_{d0}'	6,4	8,5
podélná subtransitní nakrátko	τ_d''	0,032	0,036
příčná subtransitní naprzdno	τ_{q0}''	0,050	0,060



Obr. 5.1 Schéma motorgenerátoru v ATPDraw

Levý stroj na schématu je motor, pravý generátor. V dialogu jsou pro **motor (generátor)** v jednotlivých oknech zadány následující hodnoty:

General

spojení do hvězdy; 3 pólpáry (6 pólpárů); počet cívek rotoru d-2, q-1; frekvence 50 (100 Hz); tolerance 1E-12

Magnet.

LMUD je 0,0082506 (0,0095748); *LMUQ* je 0,0059588 (0,0073339); Saturation-none

Stator

Hodnoty pro statorové vinutí určuje jmenovitá impedance stroje. Pro motor má hodnotu $12 \cdot 12 / 50 = 2,88 \Omega$.

Odpor v tabulce je pak poměrná hodnota $0,005 \cdot 2,88 = 0,0144$. Pro indukčnost d a q se bere poměrná hodnota rozptylové reaktance $0,15 \cdot 2,88 / (2 \cdot \pi \cdot 50) = 0,0013751$. Pro *LMUD* byla poměrná reaktance 0,9 a pro *LMUQ* 0,65.

	$R (\Omega)$	$L (\text{H/p.u.})$
0	0,0144 (0)	0,00055 (0)
d	0,0144 (0,0256)	0,0013751 (0,0018335)
q	0,0144 (0,0256)	0,0013751 (0,0018335)

Rotor

	$R (\Omega)$	$L (\text{H/p.u.})$
1	0,00145 (0,0012913)	0,0010313 (0,0014012)
2	0,020372 (0,027162)	0,0001019 (0,0002445)
3	0,13356 (0,13334)	0,0007192 (0,0006667)

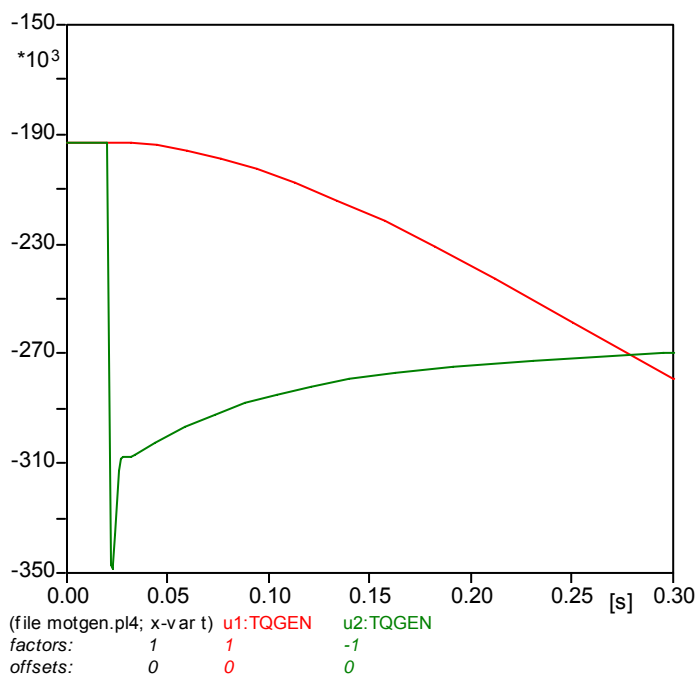
Init

9444 V a $-9,4^\circ$ (9400 V) viz výše

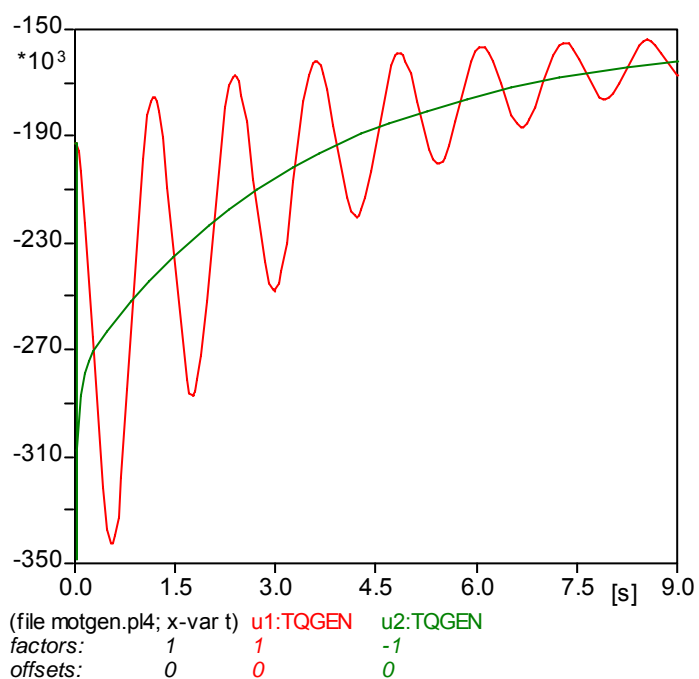
Motor je napájen ze sítě s výše uvedenými parametry. *RLC* obvod vpravo od zdroje je zátěž naprázdno $1 \text{ M}\Omega$. Levou část schématu obou strojů tvoří obvod buzení. U obou strojů je buzení konstantní (střídavý napěťový zdroj má frekvenci $10 \mu\text{Hz}$) Napětí zdroje (0,01 V) není důležité, význam má pouze horní odpor, který musí být co nejmenší, zde $1\text{E}-10 \Omega$. Dolní dva uzly slouží k zadání mechanické zátěže. Kapacita kondenzátoru ve faradech odpovídá momentu setrvačnosti v kgm^2 . U motoru je to hodnota $1\text{E}10$ a u generátoru $3,9\text{E}10 \text{ kgm}^2$. Proud zdroje v ampérech představuje mechanický moment v Nm. V obou případech je hodnota 0,01 Nm. Vodivost odporu modeluje tření na hřídeli a siemes odpovídá jednotce $\text{Nm}/(\text{rad/s})$. Hodnoty odporů jsou stejné jako u buzení $1\text{E}-10 \Omega$. Společný odpor tak zajišťuje tuhou vazbu mezi oběma hřídeli. Nakonec dolní obvod *RLC* připojený ke statoru generátoru představuje jeho zátěž 5Ω a $4,5 \text{ mH}$. Horní obvod *RLC* se sériovým spínačem simuluje přechodný děj, kdy v čase 20 ms dojde ke zvýšení zatížení motorgenerátoru paralelním připojením zátěže $4,8 \Omega$ a 4 mH .

5.3.2 Výsledky simulace přechodného děje na motorgenerátoru

Na Obr. 5.2 jsou porovnány mechanické momenty motoru ($u1$) a generátoru ($u2$). Skokové změně zatížení odpovídá rychlá změna momentu na generátoru, zatímco moment motoru se díky setrvačnosti mění jen pomalu. Průběh momentu až téměř do ustálení přechodného děje ukazuje Obr. 5.3.



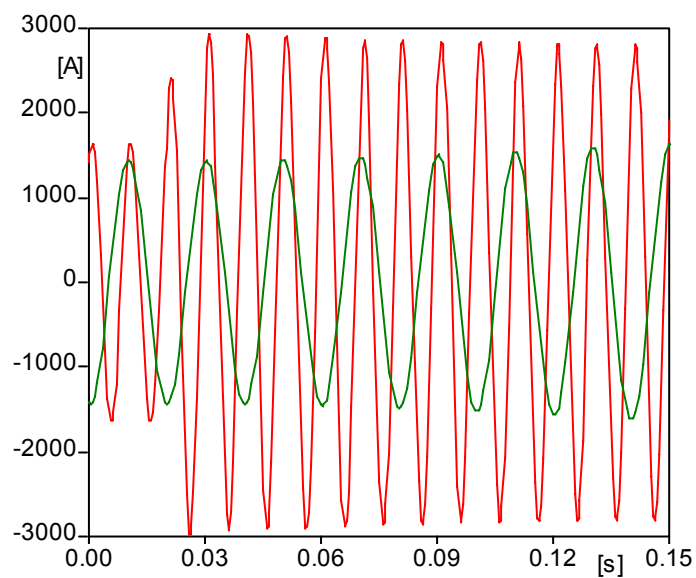
Obr. 5.2 Průběh mechanických momentů motoru (u1) a generátoru (u2), moment motoru je opačný



Obr. 5.3 Průběh mechanických momentů motoru (u1) a generátoru (u2) do času ustalování

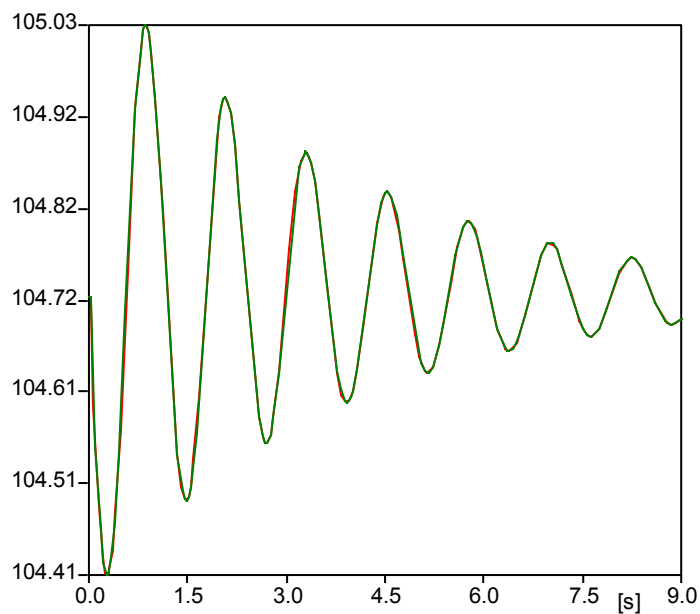
Obr. 5.4 jsou průběhy proudů statorů strojů na začátku přechodného děje. Proud motoru narůstá pozvolna, proud generátoru skokem a pak mírně klesá, je rovněž patrná rozdílná frekvence strojů. Srovnání amplitud proudů v časech uvádí následující tabulka. Zvýšení zatížení paradoxně způsobí v ustáleném stavu pokles proudu do zátěže a ze sítě a tomu také odpovídá pokles velikosti mechanického momentu na Obr. 5.3. Mechanická rychlost je přitom u obou strojů stejná, jak ukazuje Obr. 5.5.

čas (s)	0	0,03	9
motor	1430 A	1430 A	1230 A
generátor	1630 A	3000 A	2140 A



(file motgen.pl4; x-var t) c:X0011A-X0043A+c:X0011A-
c:BUSMA -BUS0A

Obr. 5.4 Průběh proudů motoru BUSMA-BUS0A a generátoru na počátku přechodného děje



(file motgen.pl4; x-var t) u1:OMEGM u2:OMEGM

Obr. 5.5 Průběh otáček motoru a generátoru během přechodného děje

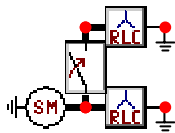
5.4 Samostatně pracující synchronní generátor

Podobným způsobem jako v předchozím případě se zadávají hodnoty pro ostatní modely UM. Následující příklad ukazuje použití druhého modelu synchronního stroje SM59. Zatímco u motorgenerátoru se mechanické otáčky po skončení přechodného děje nemění, protože jsou dány kmitočtem sítě, která napájí motor, tak u samostatně pracujícího stroje se zatížením poklesnou, pokud stroj není vybaven regulátorem otáček. Jelikož u modelu SM59 lze pomocí TACS řídit jen buzení nebo mechanický výkon, které jsou v tomto případě neřízeného modelu konstantní, nedá se vytvořit jednoduchý model motorgenerátoru (pomocí modelu SM59), u kterého se otáčky obou strojů musejí měnit stejně. V návaznosti na předchozí případ byl proto zvolen model samostatně pracujícího generátoru, který svými parametry odpovídá synchronnímu generátoru v soustrojí. Na samostatně pracující stroji je pak simulován stejný přechodný děj jako u motorgenerátoru.

5.4.1 Parametry obvodu modelu SM59

Do tabulky stroje se zadává napětí, frekvence, úhel, počet pólů, jmenovitý výkon a napětí (definují jmenovitou impedanci) a další poměrné hodnoty a časové konstanty, jak jsou uvedeny v tabulkách rozdílných a společných hodnot strojů výše. Pro moment setrvačnosti označený *HICO* při časové konstantě *H* z tabulky platí:

$$HICO = \frac{H \cdot S_N}{\omega \omega_s^2} = \frac{1,2 \cdot 45}{(200 \cdot \pi)^2} = 0,000137 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.1)$$



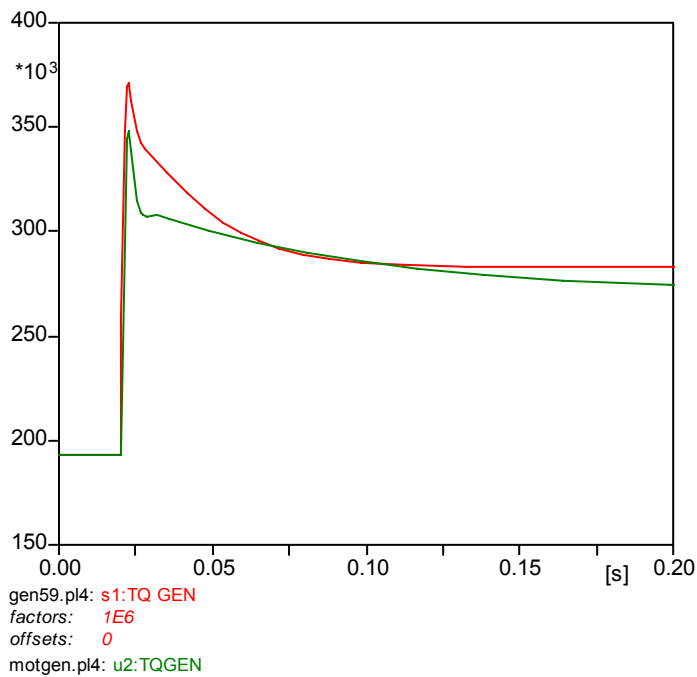
Obr. 5.6 Schéma obvodu se samostatně pracujícím synchronním generátorem

5.4.2 Výsledky simulace přechodného děje na synchronním generátoru

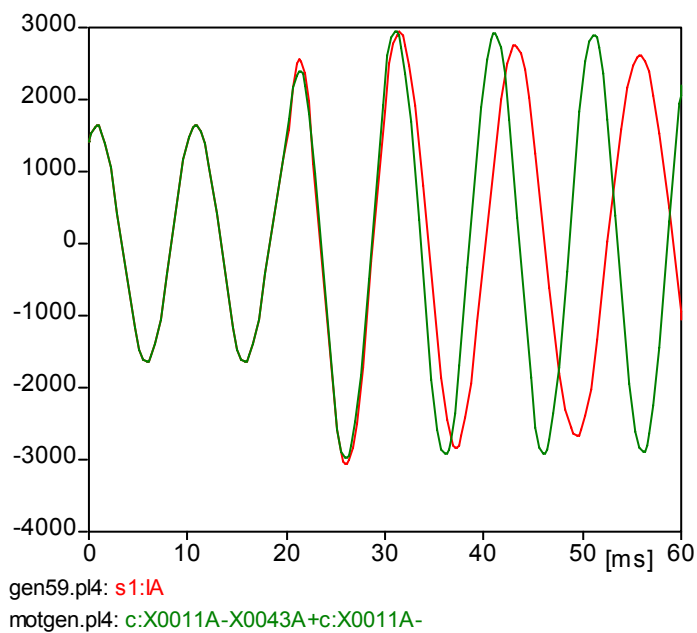
Na Obr. 5.7 jsou porovnány průběhy mechanického výkonu samostatně pracujícího stroje a motorgenerátoru. Po 9 sekundách přechodného děje klesne mechanický moment z 0,193 MNm na 0,162 MNm, zatímco na generátoru vzroste na hodnotu 0,28 MNm. Porovnání proudů statoru na Obr. 5.8 ukazuje, jak po změně zatížení začíná na generátoru klesat frekvence proudu a po 9 sekundách klesne frekvence ze 100 na asi 71 Hz. Tomu odpovídá v případě motorgenerátoru mechanický výkon P_{mg} a pro samostatně pracující generátor výkon P_{sg} :

$$P_{mg} = M \cdot 2\pi \cdot f / p = 0,162 \cdot 2\pi \cdot 100 / 6 = 17 \text{ MW} \quad (5.2)$$

$$P_{sg} = M \cdot 2\pi \cdot f / p = 0,28 \cdot 2\pi \cdot 71 / 6 = 21 \text{ MW} \quad (5.3)$$



Obr. 5.7 Porovnání průběhů mechanického momentu samostatně pracujícího stroje a motorgenerátoru



Obr. 5.8 Průběh statorového proudu samostatně pracujícího stroje a motorgenerátoru

Z uvedených příkladů je zřejmé, že záleží na řešeném přechodném ději, který model synchronního stroje bude použit. V případě potřeby regulovat buzení nebo výkon stroje se použije model SM59 s řízením TACS, jak je popsán v kapitole 5.1. Model SM59 požaduje běžné údaje stroje, model UM už potřebuje další výpočty.

Problematika modelování točivých strojů patří v programu ATP k nejsložitějším a je proto vhodné mít k dispozici základní charakteristiky stroje, pomocí nichž se dá správnost modelu verifikovat.