

Software pro návrh synchronních strojů s permanentními magnety

TN01000071/3-V8

Ondřej Vítek, Vysoké učení technické v Brně
Radoslav Cipín, Vysoké učení technické v Brně
Jaroslav Teplý, EXMONT-Energo a.s.
Stanislav Mrhač, EXMONT-Energo a.s.

Tento software byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR (projekt č. TN01000071, „Národní centrum kompetence Mechatroniky a chytrých technologií pro strojírenství“).

Označení SW: PMSM designer

Stran: 8

Verze: v1 (25. 4. 2022)

Základní popis

Software PMSM designer slouží k předběžnému návrhu synchronních strojů s permanentními magnety. Přesněji tento software slouží k předběžnému určení rozměrů synchronního stroje, k určení vinutí a k tepelnému ověření daného návrhu za účelem zrychlení celkového návrhu synchronních strojů s permanentními magnety. Po načtení základních dat za souboru ve formátu xls program na základě implementovaných algoritmů a dalších parametrů zadaných uživatelem v programu vypočte základní elektromagnetické vlastnosti stroje a provede teplotní výpočet pro jmenovitý bod. Výstupem programu jsou základní elektrické, mechanické a teplotní parametry stroje v jmenovitém pracovním bodě. Uživatel na základě těchto hodnot může dále měnit parametry stroje a v neposlední řadě je zpět uložit do souboru ve formátu xls. Díky tomuto je možné v relativně rychle posuzovat různé varianty stroje s ohledem na požadované parametry synchronního stroje v jmenovitém zatížení.

Klíčová slova

automatizovaný návrh; elektromagnetický výpočet, Synchronní stroj s permanentními magnety; software, teplotní výpočet

Interní označení

PMSM designer

Parametry softwaru

- Software pro předběžný návrh synchronních strojů s permanentními magnety
- Import a export dat ve formáty xls
- Grafické prostředí

Software snižuje časovou náročnost předběžného návrhu synchronních strojů s permanentními magnety a umožňuje velmi rychle porovnávat různé varianty návrhu s ohledem na elektromechanické a tepelné vlastnosti v jmenovitém pracovním bodě. Novost tohoto softwaru spočívá v implementaci elektromagnetických a tepelných výpočtů v jediném programu díky čemuž, se při prvotním elektromagnetickém návrhu nerespektují pouze elektrické a magnetické vlastnosti použitých materiálů, ale stroj se ověřuje i teplotně, čímž je zajištěno, že po prvotním návrhu synchronního stroje je tento stroj fyzicky realizovatelný.

Obrazová dokumentace

PMSM designer

Motor Parameters Rotor Winding Stator slot Yoke Losses Thermal

Parameter	Value
Mechanical power [kW]	1000.0
Mechanical speed [rpm]	450
Line-to-line voltage [V]	3300
Number of phases [-]	3
Number of pole pairs [-]	16
Mechanical losses [W]	3000
Power factor [-]	0.950
Efficiency [-]	0.960
Warming of winding [K]	80.0

Frequency [Hz]: 120.0

Save Calculate

Obr. 1: Zobrazení záložky Motor.

Motor	Parameters	Rotor	Winding	Stator slot	Yoke	Losses	Thermal
Parameter		Value					
Space factor of the slot [-]		0.63					
Space factor of the stator core		0.95					
Conductivity of copper at 20 degrees C [S/m]		57000000					
Temperature coefficient of resistivity for copper [1/K]		0.00381					
Density of iron [kg/m ³]		7600					
Density of PM [kg/m ³]		8300					
Density of copper [kg/m ³]		8960					
Conductivity of PM [S/m]		555555.6					
Specific loss of this material at 1.5 T and 50 Hz [W/kg]		2.38					
Coercivity of PM [A/m]		810000					
Remanence flux density of PM [T]		1.09					
Tangential stress min [Pa]		21000					
Tangential stress max [Pa]		48000					
First coefficient for average length of a coil turn [-]		2.4					
Second coefficient for average length of a coil turn [-]		0.3					
Correction coefficients for stator yoke loss [-]		2.0					
Correction coefficients for stator tooth loss [-]		2.0					
Correction coefficients for additional losses [-]		0.005					

Obr. 2: Zobrazení záložky Parameters.

Motor	Parameters	Rotor	Winding	Stator slot	Yoke	Losses	Thermal
Parameter		Value					
Rotor diameter include PM [m]		0.900		Opt. value.: 1.129 - 1.487			
Axial length [m]		0.500		Opt. value.: 0.222 - 0.292			
Number of ventilation ducts [-]		0					
Width of ventilation duct [m]		0					
Air gap length [mm]		2.5		Min. length: 1.687			
Tangential stress [Pa]		33126		Limits: 21000 - 48000			

Obr. 3: Zobrazení záložky Rotor.

Parameter	Value	
Number of slots per pole and phase [-]	1.500	Corresponding fraction: 3/2
Coil span [-]	4	Pole pitch: 4.500
Number of parallel paths in windings [-]	4	Two layer winding
Number of conductors in a slot [-]	24	Optimum: 24
Number of turns in a winding [-]	144	
Winding factor [-]	0.9452	
Number of PM in tang. direction	5	
Relative permanent magnet width [-]	0.7879	Optimum: 0.889
Fundamental air-gap flux peak density [T]	0.80	Limits: 0.8 - 1.05
Linear current densit [kA/m]	61.6	Limits: 35 - 80

Winding distribution of the first phase in the slots

[2 1 0 0 -1 -2 0 0 0]

Obr.4: Zobrazení záložky Winding.

Parameter	Value	
Width of the stator teeth [mm]	8.244	
Dimension h1 [mm]	1.0	
Dimension h2 [mm]	3.0	
Dimension h4 [mm]	70.0	Total slot height: 74.0
Dimension bs [mm]	11.5	
Dimension h3 insulation [mm]	5.0	
Dimension h insulation [mm]	0.5	
Stator current density [A/mm]	4.5	Estimated value of stat. current: 243.5
Actual area of one conductor in a stator slot [mm ²]	22.00	Minimum cross section: 10.7
Wound area of the stator slot [mm ²]	838.1	
Total area of the slot [mm ²]	851.0	Free area: 677.2
Flux density in the stator tooth [T]	1.59	Required: 1.6
Magnetic voltage of the tooth [A]	259.6	
Field strengths in the teeth [A/m]	3508.8	

Obr. 5: Zobrazení záložky Stator slot.

Parameter	Value	
PM height	10.0	Minimum: 5.8
Magn. flux in stator yoke [T]	1.30	
Outer stator diameter [m]	1.100	Minimum: 1.089

Magnetic voltage [A]:

PM: 4.6
 Air gap: 1729.0
 Tooth: 259.6
 Stator yoke: 4.8
 Rotor yoke: 4.0

 Total: 2002.1

Obr. 6: Zobrazení záložky Yoke.

Inductances [mH]:

Magnetizing inductance: 9.842
 Air-gap leakage inductance: 9.842
 Slot leakage inductance: 2.083
 Tooth tip leakage inductance: 0.186
 End winding leakage inductance: 0.320

 Total: 12.573

DC resistance of a phase winding [Ohm]:

at 20 °C: 0.043
 at 100 °C: 0.056

Losses [W]:

Core loss in the stator yoke: 3361.6
 Core loss in the tooth: 5961.3
 Total iron losses: 9322.9
 PM losses: 230.3
 Additional losses in the machine: 5000.0
 Mechanical losses: 3000.0
 Stator resistive losse: 9928.7

 Total losses [kW]: 27.482
 Input powe [kW]: 1027.482
 Mechanical power [kW]: 1.000
 Efficiency [%]: 97.33

Currents [A]:

I_s: 243.548
 I_d: -141.633
 I_q: 198.130
 Load angle [deg]: 1.429
 Power factor of the machine: 0.738

Obr. 7: Zobrazení záložky Losses.

Motor	Parameters	Rotor	Winding	Stator slot	Yoke	Losses	Thermal
Popis		Hodnota		<input type="checkbox"/> Enable fan cooling			
Ambient temperature [°C]		20.0		Outer fan cover diameter [mm]		1350.0	
Heat transfer coefficient to ambient [W/m ² K]		500.0		Perimeter of fin plate [mm]		270.0	
Operating altitude [m]		0.0		Air flow quantity [m ³ /s]		10.000	
Frame length [mm]		1300.0					
Outer diameter of frame [mm]		1260.0					
Thickness of frame [mm]		70.0					
Thermal conductivity of frame [W/mK]		60.0					
Bearing width [mm]		100.0		Temperatures:			
Outer diameter of bearing [mm]		500.0		-----			
Thickness of endshield [mm]		30.0		Mean temperature of stator winding [°C]: 51.5			
Thermal conductivity of endshield [W/mK]		60.0		Stator teeth temperature [°C]: 84.2			
Diameter of conductor without izolation [mm]		5.352		Stator core temperature [°C]: 59.2			
Diameter of conductor with izolation [mm]		5.848		Magnet temperature [°C]: 83.4			
Thickness of slot izolation [mm]		2.0		Rotor core temperature [°C]: 82.6			
Thermal conductivity of izolation [W/mK]		0.3		Maximal temperature [°C]: in Sheets 84.4			
Thermal conductivity of magnet [W/mK]		10.0					
Bandanding thickness [mm]		0.0					
Shaft diameter [mm]		300.0					
Number of fins		6.0					
Thickness of fins [mm]		15.0					
Total length of shaft [mm]		1766.0					
		<input type="button" value="Save"/>		<input type="button" value="Calculate"/>			

Obr. 8: Zobrazení záložky Thermal.

Vstupní data

Pro správnou funkci programu je potřebné načíst vstupní data ze zdrojového souboru ve formátu xls, který je nedílnou součástí programu. V tomto souboru jsou veškeré návrhové parametry používané v programu, takže uživatel je může téměř libovolně měnit. Druhou možností, jak měnit jednotlivé parametry, je pomocí grafického prostředí programu po jejich načtení programem.

Návod k použití

Vyvinutá software pracuje a spustitelný na platformě Windows 10.

Po spuštění programu je uživatel nahraje zdrojový soubor ve formátu xls. Po úspěšném importování dat z tohoto souboru do programu jsou v grafickém prostředí

programu zobrazeny jednotlivé parametry, které může uživatel téměř libovolně měnit, tedy s ohledem na reálné parametry navrhovaného stroje.

Popis jednotlivých záložek a tlačítek programu :

- Záložka **Motor** je určena k zadání základních parametrů navrhovaného stroje.
- Záložka **Parameters** je určena k zadání základních výpočtových parametrů použitých při návrhu synchronního stroje.
- Záložka **Rotor** je určena k návrhu základních rozměrů rotoru.
- Záložka **Winding** je určena k návrhu statorového vinutí.
- Záložka **Stator slot** je určena k návrhu statorových drážek.
- Záložka **Yoke** je určena k návrhu statorového jha.
- Záložka **Losses** je určena k ověření elektromagnetického návrhu synchronního stroje.
- Záložka **Thermal** je určena k ověření teplotního návrhu synchronního stroje.
- Tlačítko **Calculate** slouží k přepočtu všech parametrů stroje.
- Tlačítko **Save** slouží k uložení všech proměnných do souboru formátu xls.

Minimální systémové požadavky

- Windows 10, nebo vyšší.
- Jakýkoliv Intel nebo AMD procesor s architekturou x86-x64.
- Minimálně 2 GB prostor na pevném disku.
- Minimálně 16 GB RAM.