

ПРАКТИЧЕСКИ ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ В СИМУЛАЦИОННИ МОДЕЛИ НА КОРАБНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

Милен Дуганов, Пламен Парушев, Валентин Гюров

Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

PRACTICAL APPROACH FOR DETERMINATION OF POWER TRANSFORMERS PARAMETERS IN SIMULATIONS MODELS OF SHIPBOARD ELECTRICAL SYSTEMS

Milen Duganov, Plamen Parushev, Valentin Gyurov

Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment

Abstract

The use of simulation models for analysis of operating modes and regimes in marine energy systems is a modern widespread method. The adequate use of the models and their equivalence to real technical systems is related to the determination of a certain number of parameters of the elements in the scheme. This report discusses the part related to the simulation of power transformers in Sim Power Systems (Matlab). The specificity in this case is the need to determine parameters required by the software, which in most cases are not provided by the manufacturers. The report presents the methodology for determining the necessary parameters with the use of catalog data of the transformers, which are well known and they are indicated on the signboard of the transformers. This approach allows the creation of simulation models for different types of existing transformers without the need to require detailed information from manufacturers. The presented methodology for determining the parameters for specific types of MV/LV transformers is applied in the simulation of container ship.

Keywords: ships transformers, transformer simulation, ships electrical systems, onboard electrical equipment

ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на симулационни модели е широко разпространен метод за изследване и анализ на режимите в сложни технически системи. Получаването на адекватни резултати от изследванията, е свързано с прецизно дефиниране на параметрите на елементите на модела. Настоящият доклад представя методика за определяне на параметрите на корабни силови трансформатори, които са необходими за симулационните модели в Sim Power System (Matlab). Особеност на разглеждания проблем е нуждата от дефиниране на параметрите на магнитопровода, първичната и вторичната намотка – R_m , X_m , R_1 , X_1 , R_2 и X_2 в действителни или относителни единици, в зависимост от използваната версия на продукта.

Тези параметри в общия случай не са включени в каталожната информация на силовите трансформатори. Представената синтезирана методика позволява определянето на търсените параметри от общодостъпните каталожни данни или табелките на трансформаторите. Демонстрирано е приложение на методиката за специфични трансформатори корабно изпълнение 6.6/ 0.38 kV [4], като за пример е приета схема на електроенергийна система на кораб за превоз на товари тип „контейнеровоз”.

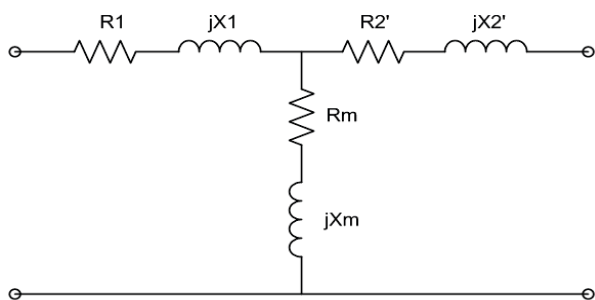
МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ В МАТЛАВ

Методиката се базира на използването на „Т” заместващи схеми на силовите тран-

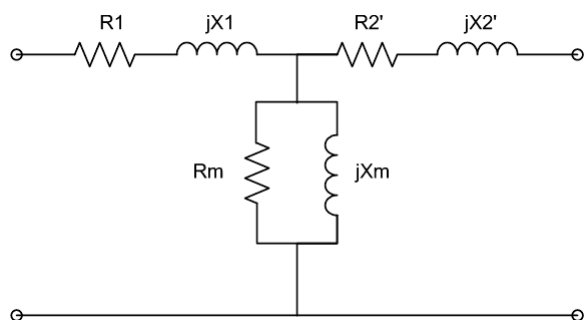
сформатори и параметри при опит на празен ход и късо съединение. По отношение на Т заместващата схема трябва да се отбележи, че са налице два варианта на използването ѝ – с последователен магнитен контур R_m , X_m , какъвто е използвания в българската литература (Фигура 1), и с паралелен магнитен контур, какъвто се използва при дефинирането на величините в Matlab (Фигура 2).

За входни величини се използват каталожните данни на трансформатора, които са показани и на неговата указателна табела. Това са величините S_N [kVA] – номинална мощност на трансформатора; U_1 [kV] – номинално първично линейно напрежение; U_2 – номинално вторично линейно напрежение, $u_{cs\%}$ [%] – напрежение на късо съединение, $I_0\%$ [%] – ток на празен ход, ΔP_0 [W] – загуби на празен ход, ΔP_{SC} – загуби на късо съединение.

Общозвестно е, че заместваща схема на трифазни трансформатори се съставя като за еднофазни [1], [2], [3].



Фиг. 1. „Т” схема със сериен намагнитващ контур



Фиг. 2. „Т” схема с паралелен намагнитващ контур

Тъй като трифазните трансформатори имат различни групи и схеми на свързване, за прегледност на методика се предлага именуването напреженията на U_{C1} и U_{C2} -

напрежения върху намотката на първична и вторична страна на трансформатора; I_{C1} и I_{C2} – токове, протичащи в първичната и вторичната намотка на трансформатора

По този начин методиката ще бъде приложима за всички видове свързвания на намотките, т.к. заместващата схема се разглежда за едното ядро на трансформатора. Прилагат се формулите в следната последователност [5]:

$$I_{1C} = \frac{S_H}{3 \cdot U_1} \quad (1) \quad I_0 = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{1C} \quad (2)$$

Тока на празен ход I_{0m} , консумиран от мрежата, ще бъде $I_{0m}=I_0$ – при свързване на първичната намотка в звезда или $I_{0m}=\sqrt{3} \cdot I_0$ – при свързване на първичната намотка в триъгълник.

Съпротивленията на празен ход на трансформатора се определят с формули (3), (4) и (5).

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \quad (3) \quad R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} \quad (4)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (5)$$

Съответно за последователен намагнитващ контур на трансформатора се получава (6), (7):

$$R_m = R_0 \quad (6) \quad X_m = X_0 \quad (7)$$

За задаване на параметрите в симулационния модел на Sim Power Sysetms (Matlab) е необходимо преобразуването на съпротивленията от изчислените за сериен към R_m и X_m за паралелен магнитен контур. Тази трансформация се извършва с формули (8) и (9).

$$X_m = \frac{R_0^2 + X_0^2}{X_0} \quad (8)$$

$$R_m = \frac{R_0^2 + X_0^2}{R_0} \quad (9)$$

Индуктивното съпротивление L_m се изчислява по формула (10).

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} \quad (10)$$

Съпротивленията на късо съединение на трансформатора се определят с формули (11), (12) и (13).

$$Z_{SC} = \frac{U_{SC}}{I_{SC}} \quad (11) \quad R_{SC} = \frac{P_{SC}}{3 \cdot I_{SC}^2} \quad (12)$$

$$X_{SC} = \sqrt{Z_{SC}^2 - R_{SC}^2} \quad (13)$$

където $I_{SC}=I_{1C}$ – номиналният ток през намотката на трансформатора, протичащ при опит на късо съединение с понижено напрежение U_{SC} (14).

$$U_{SC} = \frac{u_{SC\%}}{100} \cdot U_{1C} \quad (14)$$

С приближение се приема $Z_1=Z_2$, откъдето за определяне на параметрите R_1 , X_1 , R_2 и X_2 се използват формулите:

$$R_1 = \frac{R_{SC}}{2} \quad (15) \quad R_2' = R_1 \quad (16)$$

$$X_1 = \frac{X_{SC}}{2} \quad (17) \quad X_2' = X_1 \quad (18)$$

където: R_2' и X_2' са приведените съпротивления към първичната намотка. Действителните съпротивления се определят по формули (19) и (20).

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} \quad (19) \quad X_2 = \frac{X_2'}{k^2} \quad (20)$$

където: k – коефициента на трансформация, определен по формулата:

$$k = \frac{U_{1C}}{U_{2C}} \quad (21)$$

Следва да се има предвид, че в случая за изчисляването на k се използват напреженията на намотките, които са различни при различни групи на свързване, а не отношението на броя навивки на намотките.

Индуктивностите L_1 и L_2 се извършва с формули (22), (23).

$$L_1 = \frac{X_1}{\omega} \quad (22) \quad L_2 = \frac{X_2}{\omega} \quad (23)$$

За версии на Matlab, ползващи втора генерация симулационни блокове (версии 2013-2017), параметрите на трансформаторите могат да бъдат зададени в система SI или в относителни единици (р.у.).

За версии ползващи трето поколение блокове (2019 и по-нови), задаването е само в относителни единици, приведени към първичната намотка. За базисно се приема съпротивлението на намотката при номинално натоварване (26)

$$Z_b = \frac{U_{1C}}{I_{1C}} \quad (26)$$

Изчисляването на параметрите в относителни единици се извършва с формулите:

$$R_m^* = \frac{R_m}{Z_b} \quad (27) \quad X_m^* = \frac{X_m}{Z_b} \quad (28)$$

$$R_1^* = R_2^* = \frac{R_1}{Z_b} \quad (29)$$

$$X_1^* = X_2^* = \frac{X_1}{Z_b} \quad (30)$$

С помощта на синтезираната методика ще бъде направена симулация на специфични корабни силови трансформатори, имащи голяма мощност от порядъка на 2-5 MVA, но проектирани за нива 6.6/0.38 kV.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДИКАТА ЗА СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ В КОРАБНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

За демонстрация на методиката е избрана схема на контейнеровоз, ползваща трансформатори средно към ниско напрежение (Фигура 3). Схемата използва 6 бр. СТ 3000 kVA, 6.6/0.38 kV с параметри $u_{SC}\% = 6\%$, $\Delta P_0 = 6500[W]$, $\Delta P_{SC} = 35000[W]$.

Изчислените параметри на трансформаторите са показани в Таблица 1.

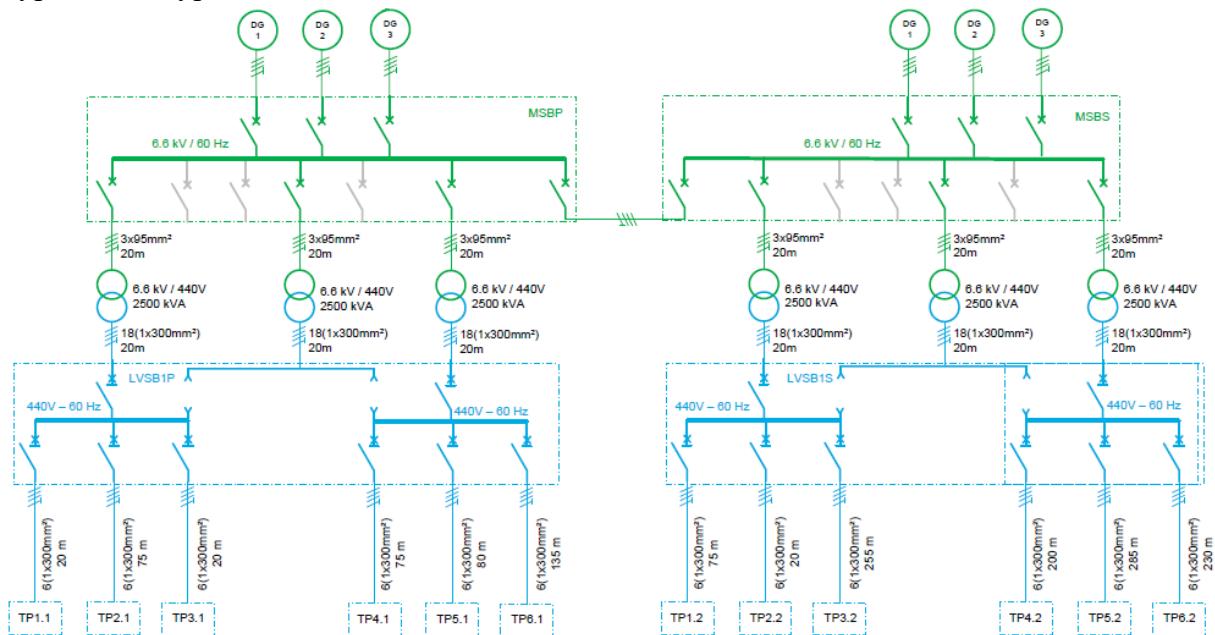
Таблица 1. Изчислени параметри

R_m [ohm]	$2.01 \cdot 10^4$	R^*_m [p.u.]	461.538
X_m [ohm]	$4.039 \cdot 10^3$	X^*_m [p.u.]	92.726
R_1 [ohm]	0.254	R^*_1 [p.u.]	$5.833 \cdot 10^{-3}$
X_1 [ohm]	1.282	X^*_1 [p.u.]	0.029
R_2 [ohm]	$2.808 \cdot 10^{-4}$	R^*_2 [p.u.]	$5.833 \cdot 10^{-3}$
X_2 [ohm]	$1.416 \cdot 10^{-3}$	X^*_2 [p.u.]	0.029
L_m [H]	12.857	L^*_m [p.u.]	не се използват в симулацията
L_1 [H]	$4.08 \cdot 10^{-3}$	L^*_1 [p.u.]	
L_2 [H]	$4.509 \cdot 10^{-6}$	L^*_2 [p.u.]	

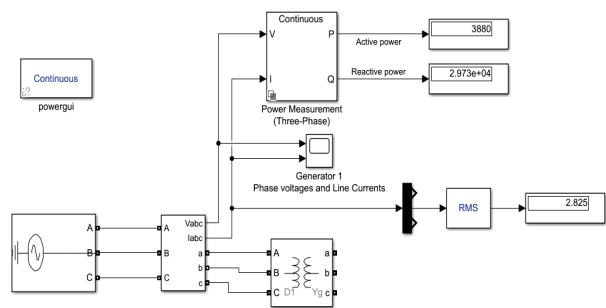
За проверка адекватността на методиката при приложението в Matlab са разработени симулационни модели за версии „втора генерация“ и „трета генерация“.

Симулация с блокове „втора генерация“

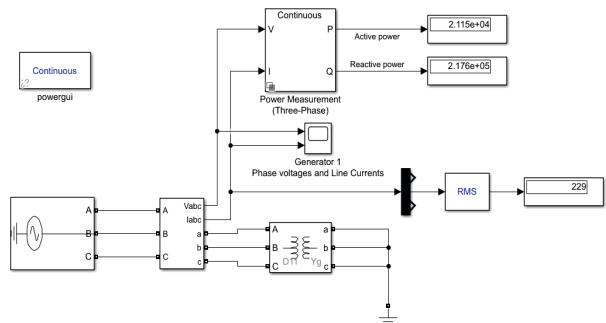
Симулационните модели са показани на Фигура 4 и Фигура 5.



Фиг 3. Еднолинейна електрическа схема на кораб за превоз на товари тип „контейнеровоз“



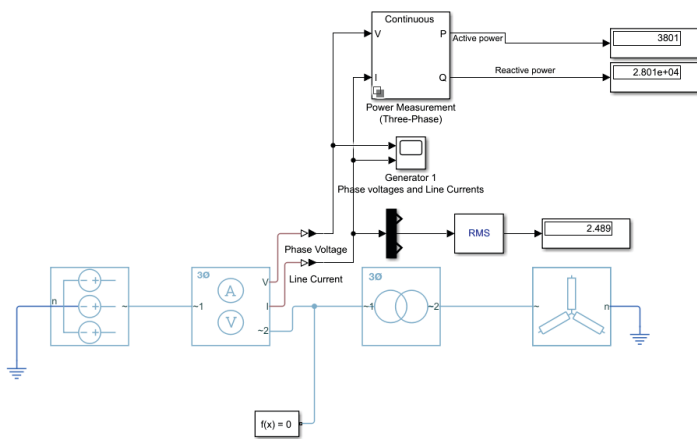
Фиг. 4. Модел в Matlab „втора поколение“ – симулация на трансформатор на празен ход



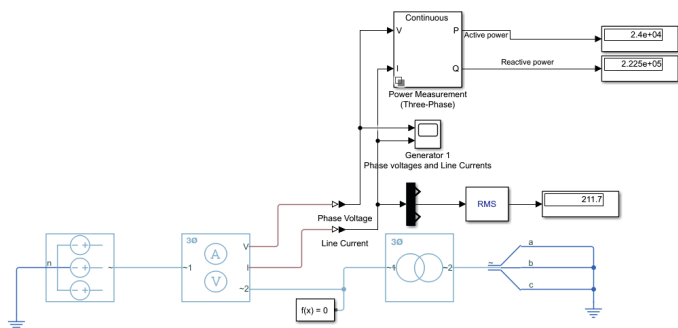
Фиг. 5. Модел в Matlab “втора поколение” – симулация на трансформатор опит на късо съединение

• Симулация с блокове „трета генерация“

Симулационните модели са показани на Фигура 6 и Фигура 7. В режим на празен ход е зададен товар с пренебрежима стойност – 1W, който не оказва влияние спрямо мощността на трансформатора.



Фиг. 6. Модел в Matlab „трето поколение” – симулация на трансформатор на празен ход



Фиг. 7. Модел в Matlab „трето поколение” – симулация на трансформатор на празен ход

Данни от симулациите за използваните трансформатори са показани в Таблица 1.

Таблица 1. Сравнение на параметри

Параметър	Номинална стойност	Получена стойност	Грешка [%]
<i>Симулация „Втора генерация”</i>			
ΔP_0 [W]	6500	6485	0.23
ΔP_{sc} [W]	35000	35100	0.29
u_{sc} [%]	396	391	1.26
<i>Симулация „Трета генерация”</i>			
ΔP_0 [W]	6500	6606	1.63
ΔP_{sc} [W]	35000	35500	1.57
u_{sc} [%]	396	391	1.26

Получената грешка между параметрите на трансформаторите зададени по каталог или табелка на трансформатора и получените от симулациите резултати е до 2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите показват работоспособността на представената методика за дефиниране параметрите на силови трансформатори в корабни електроенергийни системи. Представената методика е приложима за симулационни модели от второ и трето поколение. Предложеният синтезиран подход за дефиниране на параметрите на силови трансформатори и в частност на специализирани за корабно приложение - такива с мощности 2÷5 MVA, но относително ниски стойности на страна средно напрежение – 6÷7.2 kV, се характеризира с адекватност и висока за практиката точност от 1-2%. Трябва да се отбележи, че тази грешка е от порядъка на грешката на физическото измерване при определяне на параметрите на трансформаторите и закръглението на отделните каталожни величини. Съществена особеност за приложение на методиката, е начина за въвеждането на параметрите в симулационните блокове на Matlab в зависимост от версията. Използването на величините в относителни единици е свързано с използването на приведените им стойности както към първичната намотка, така и към базисното съпротивление.

Резултатите могат да бъдат полезни за специалисти в практиката, изследователи и студенти.

Представеното изследване е част от работата по проект НП1/2021 „Разработване на комплексни методи за анализ и диагностика на състоянието на корабни електроцентрали”, финансиран по Фонд научни изследвания – Технически университет-Варна.

REFERENCE

- [1] McLiman C. Transformers and inductor design handbook. New York: CRC Presss Taylor and Francis group. 2011.
- [2] Heathcote M. Transformer book. A practical technology of the power transformers. Newnes Elsevier. Oxford: 1998

- [3] Patel M. Shipboard electrical power systems, New York: CRC Presss Taylor and Francis group. 2012.
- [4] Hall D. Practical marine electrical knowledge. Whiterby Publishers. London:1 1999.

- [5] Yagup. V. K. opredeleniju modeley trasformatorov. Kiev. Jurnal "Svetlotehnika i Energetika" br. 2/2014.