

## MODELING OF POWER CONVERTERS IN MICROGRIDS

**Hristiyan Kanchev**

*Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Department of Power Electronics, 1000 Sofia, 8 blvd. St. Kliment Ohridski*

### Abstract

*This paper presents the modeling of a microturbine-based system for distributed connected to a three-phase low voltage grid. The developed mathematical model includes a primary mover coupled to the shaft of a permanent magnet synchronous generator with a rated power of 30 kVA. The electronic conversion system consists of a three-phase PWM rectifier and a grid-connected inverter. The undesirable harmonic content is filtered by and LCL filter. The presented model is implemented in Matlab/Simulink environment. Simulation results confirm the correct operation of the model and the power converters control system. The developed model can be used as a building block in larger models including multiple types of generators, energy storage devices and loads.*

**Keywords:** microgrids, modeling, distributed generation, conversion, electrical energy.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Децентрализираното производство на електроенергия (наричано още разпределено/разпръснато производство на електроенергия) представлява генерирането на електричество в инсталации с относително малка мощност, свързани към разпределителната мрежа (и по-рядко към преносната мрежа на средно напрежение). Често тези микро- и наномрежи представляват хибридни структури съдържащи възобновяеми източници на енергия, средства за нейното съхранение, както и конвенционални генератори, използващи като първичен източник двигател с вътрешно горене или газова турбина с малка мощност (миктурбина). В концепцията за интелигентната мрежа (т.нар Smart Grid) (фиг. 1) децентрализираното производство и потреблението се управляват на локално ниво от контролера на всяка микромрежа, който координира генераторите, средствата за запасяване на енергия и товарите. Микромрежите могат да работят автономно или свързани към разпределителната мрежа. По този начин всяко локално групиране на децентрализирани генератори

и товари може да се разглежда от операторите на разпределителната и преносната мрежа като една цялост, която може да бъде консуматор или производител на електроенергия в различни моменти.



Фиг. 1. Децентрализирано производство на електроенергия в микромрежи

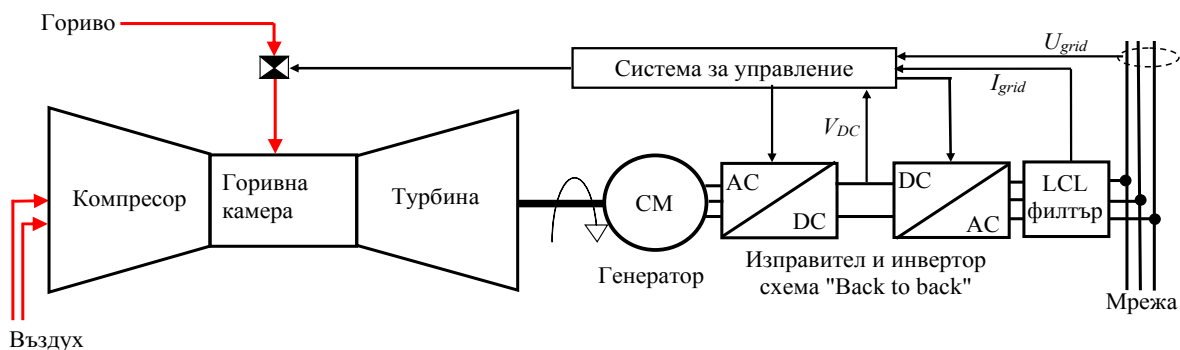
По този начин прогнозирането на натоварването на мрежите, диспечерането и координираните действия на останалите участници в Електроенергийната система (ЕЕС) могат да бъдат оптимизирани, което би довело до оптимална работа и на цялата система [1]-[5].

В доклада е представено моделиране в среда Matlab/Simulink на газова микротурбина, свързана към трифазна

мрежа ниско напрежение (НН). Моделът на преобразувателната система съдържа първичен източник, куплиран директно към вала на синхронна машина с постоянни магнити с номинална мощност 30kVA. Котвените токове и е.д.н. на генератора са с променяща се във времето честота (до 1600Hz), поради което връзката на генератора с мрежата се осъществява чрез система от трифазни изправител и инвертор (т.нар топология “back to back”) и филтър (фиг.2). Проведени са симулации с променлива във времето мощност, подавана от първичния двигател към генератора. Системата за управление следи обменната между отделните звена мощност и изработва съответните задания за токове и напрежения така че наличната мощност на първичния двигател да бъде отдавана като активна мощност в мрежата. Заданията за токовете отдавани в мрежата се свеждат до регулиране коефициентите на запълване на електронните ключове в преобразувателите. Резултатите от симулациите потвърждават коректната работа на моделите и системата за управление на преобразувателите в тях. Разработеният модел на генератор, свързан към мрежа може да послужи като градивна част в модел на по-голяма система, включваща определен брой генератори, средства за съхранение на енергия и товари.

## КОГЕНЕРАЦИЯ ЧРЕЗ ГАЗОВИ МИКРОТУРБИНИ

Генератори на електроенергия, задвижвани от газова турбина с малка мощност се използват все по-често за автономно захранване на отдалечени места,



Фиг. 2. Принципна структура на газова микротурбина, свързана към мрежа ниско напрежение

както и за децентрализирано производство на електроенергия и когенерация (комбинирано производство на електрическа и топлинна енергия). За гориво се използва най-често пропан-бутан или метан [3]-[5]. Принципът на работа е следният: входящият въздух се сгъстява в радиален центробежен компресор, смесва се с горивото и изгаря в горивната камера (фиг. 2). Създадената от изгарящата гориво-въздушна смес механична сила задвижва радиална турбина, намираща се на общ вал с компресора за входящия въздух. Електрическият генератор също е куплиран на общия вал на турбината и компресора. В зависимост от модела и номиналната мощност, газовата микротурбина и електрическият генератор имат номинална скорост на въртене от 60 000 до 120 000 оборота в минута [5]. Генераторът е синхронна машина с постоянни магнити. Котвените токове и е.д.н. се изправят и посредством междинен постояннотоков кръг и инвертор мощността се отдава в мрежата. Връзката с мрежата е осъществена посредством LCL филтър, който филтрира нежелания хармоничен състав.

## МЕХАНИЧНА ЧАСТ НА МОДЕЛА

За моделиране на механичната част е използван едномасов модел на механичната система с инерция приведена към общия вал (респективно ротора на машината). Така уравненията на модела придобиват вида [5]:

$$\frac{d\Omega_{rot}}{dt} = \frac{1}{J} C_{rotor} \quad (1)$$

$$C_{rot} = C_{tur} - C_{em} - C_m \quad (2)$$

$$C_m = f_m \cdot \Omega_{rotor} \quad (3)$$

Където  $J$  е приведения към ротора инерчен момент, въртящия момент на ротора е  $C_{rotor}$ , въртящия момент на първичния източник е  $C_{tur}$ , а  $C_{em}$  е електромагнитния момент на машината. Загубите от механично триене са моделирани чрез съпротивителния момент на механично триене  $C_m$ , който е линейна функция на коефициента на механично триене  $f_m$ .

Входна величина на модела е мощността на първичния двигател  $P_{prim}$  с въртящ момент  $C_{tur}$ :

$$P_{prim} = C_{tur} \cdot \Omega_{rotor} \quad (4)$$

### МОДЕЛИРАНЕ НА ГЕНЕРАТОРА

Генераторът е двуполусна двуполусна синхронна машина с постоянни магнити с номинална мощност 30kVA. Моделът е представен във въртяща се със синхронна честота координатна система се описва от следните уравнения:  $i_{gen\_abc} = [i_{gen\_a}, i_{gen\_b}, i_{gen\_c}]^T$  е векторът съставен от моментните стойности на котвените токове, а  $u_{gen\_abc} = [u_{gen\_a}, u_{gen\_b}, u_{gen\_c}]^T$  на напреженията.

Чрез трансформация на Парк трифазната система токове и напрежения се редуцира до двуфазна, описана чрез стационарни вектори във въртяща се с ъгловата скорост на ротора координатна система  $d-q$  [3], [5].

$$i_{gen\_abc} = P_{park}^{-1} \cdot i_{gen\_dq} \quad (5)$$

$$u_{gen\_dq} = P_{park} \cdot u_{gen\_abc} \quad (6)$$

Където  $P_{park}$  и  $P_{park}^{-1}$  са матриците съответно на правата и обратна



Фиг. 3. Модел на преобразуване на енергията от първичния двигател до котвените токове и напрежения на синхронния генератор

трансформации на Парк,  $i_{gen\_dq} = [i_{gen\_d}, i_{gen\_q}]$  е векторът описващ моментните стойности на токовете по оси  $d$  и  $q$ , а  $u_{gen\_dq} = [u_{gen\_d}, u_{gen\_q}]$  е векторът описващ моментните стойности на напреженията.

Така уравненията описващи котвените токове придобиват вида:

$$\frac{di_{gen\_d}}{dt} = \frac{1}{L_{s\_d}} (u_{gen\_d} - R_s \cdot i_{gen\_d} - e_{sm\_d}) \quad (7)$$

$$\frac{di_{gen\_q}}{dt} = \frac{1}{L_{s\_q}} (u_{gen\_q} - R_s \cdot i_{gen\_q} - e_{sm\_q}) \quad (8)$$

Където  $L_{s\_d}$  и  $L_{s\_q}$  са еквивалентните индуктивности на котвените намотки по осите  $d$  и  $q$ ,  $R_s$  еквивалентното активно съпротивление на котвените намотки, а  $e_{sm\_d}$  и  $e_{sm\_q}$  еквивалентните електродвижещи напрежения.

Електромеханичното преобразуване се моделира чрез уравненията:

$$e_{gen\_d} = -p \cdot L_{sq} \cdot \Omega_{gen} \cdot i_{gen\_q} \quad (9)$$

$$e_{gen\_q} = p \cdot \Phi_m \cdot \Omega_{gen} + p \cdot L_{sq} \cdot \Omega_{gen} \cdot i_{gen\_d} \quad (10)$$

$$\frac{di_{gen\_q}}{dt} = \frac{1}{L_{s\_q}} (u_{gen\_q} - R_s \cdot i_{gen\_q} - e_{sm\_q}) \quad (11)$$

Където  $p$  е броят двойки полюси,  $\Phi_m$  е роторния магнитен поток. Електромагнитния момент на машината се изразява чрез:

$$C_{em} = p \cdot \Phi_m \cdot i_{gen\_q} + (L_{sd} - L_{sq}) \cdot p \cdot i_{gen\_d} \cdot i_{gen\_q} \quad (12)$$

Описан чрез горните уравнения, модела на преобразуване от мощността на първичния източник до котвените напрежения и токове на синхронния генератор е представен на фиг. 3

## МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИТЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Котвените токове и напрежения на генератора се изправят посредством изправител с ШИМ и се отдават в мрежата от трифазен инвертор през LCL филтър. Тази топология е известна още като “back to back”. Моделирането е извършено чрез осреднен във времето модел на системата от силови електронни преобразуватели (фиг. 4). Изправителя е моделиран като два независими източника на напрежение  $u_{m13}$  и  $u_{m23}$  и един зависим източник на ток  $i_{dc\_1}$  свързани чрез функционалните зависимости  $m_1$  и  $m_2$ :

$$u_{m13} = m_1 u_{dc} \quad (13)$$

$$u_{m23} = m_2 u_{dc} \quad (14)$$

$$i_{dc\_1} = m_1 i_{gen\_a} + m_2 i_{gen\_b} \quad (15)$$

Фазните напрежения се изразяват чрез:

$$u_{gen\_a} = \frac{2}{3} u_{m13} - \frac{1}{3} u_{m23} \quad (16)$$

$$u_{gen\_b} = -\frac{1}{3} u_{m13} + \frac{2}{3} u_{m23} \quad (17)$$

Трифазният инвертор е моделиран аналогично чрез един зависим източник на ток и два независими източника на напрежение, свързани чрез следните уравнения:

$$u_{inv\_13} = m_{inv1} u_{dc} \quad (18)$$

$$u_{inv\_23} = m_{inv2} u_{dc} \quad (19)$$

$$i_{dc\_2} = m_{inv1} i_{inv\_a} + m_{inv2} i_{inv\_b} \quad (20)$$

Модела на междинния постояннотоков кръг е съставен от следните уравнения:

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_{Cdc} \quad (21)$$

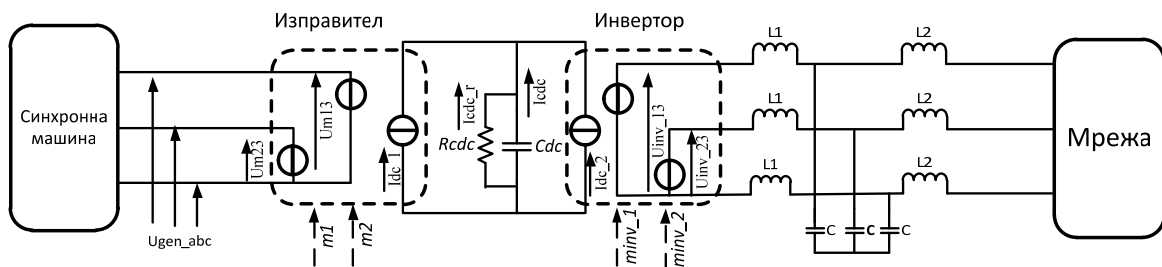
$$i_{Cdc} = i_{dc\_1} - i_{dc\_2} - i_{Cdc\_r} \quad (22)$$

$$i_{Cdc\_r} = \frac{1}{R_{Cdc}} u_{dc} \quad (23)$$

Където  $C_{dc}$  е капацитета на кондензатора в междинния постояннотоков кръг, а  $R_{Cdc}$  е неговото еквивалентно шунтово съпротивление,  $i_{Cdc\_r}$  е тока през него.

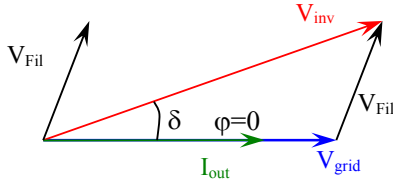
Ако напрежението  $U_{dc}$  се поддържа константно, това означава, че цялата мощност от изхода на изправителя се консумира от инвертора и съответно се отдава в електрическата мрежа (при хипотеза, че загубите във филтъра, междинния постояннотоков кръг и електронните ключове са пренебрежимо малки). Коефициентът на запълване на ключовете се регулира чрез PI регулатор така че да се поддържа константно напрежението на междинния постояннотоков кръг.

Управлението на инвертора става по два регулиращи контура [5]: регулатор на напрежението на междинния постояннотоков кръг  $U_{dc}$  и регулатор на токовете отдавани в мрежата. Токовете, обменяни с мрежата се измерват чрез падовете на напрежение върху индуктивностите  $L1$  на всяка от трите фази на LCL филтъра. За отдаване на активна мощност в мрежата токовете трябва да са във фаза със съответните фазни напрежения на мрежата. От еквивалентната векторна диаграма за една от фазите и при честотата на основния хармоник (50 Hz) (фиг. 5) имаме пад  $V_{Fil}$  върху импеданса на филтъра  $Z_{Fil}$ , който ни е



Фиг. 4. Осреднен модел на електронните преобразуватели

известен  $I_{out}$  е тока отдаван в мрежата,  $V_{grid}$  е напрежението на мрежата, следователно търсеното напрежение на изхода на инвертора е  $V_{inv}$ , така че тока отдаван в мрежата да бъде във фаза с нейното напрежение.



Фиг.5. Векторна диаграма на една от фазите.

Уравненията, моделиращи мрежовия филтър са следните:

$$u_{L1\_fil} = u_{inv\_abc} - u_{Cfil} \quad (24)$$

$$\frac{di_{L1\_fil}}{dt} = \frac{1}{L_{L1\_fil}} \cdot u_{L1\_fil} \quad (25)$$

$$\frac{du_{Cfil}}{dt} = \frac{1}{C_{fil}} \cdot i_{C\_fil} \quad (26)$$

$$\frac{di_{L2\_fil}}{dt} = \frac{1}{L_{L2\_fil}} \cdot u_{L2\_fil} \quad (27)$$

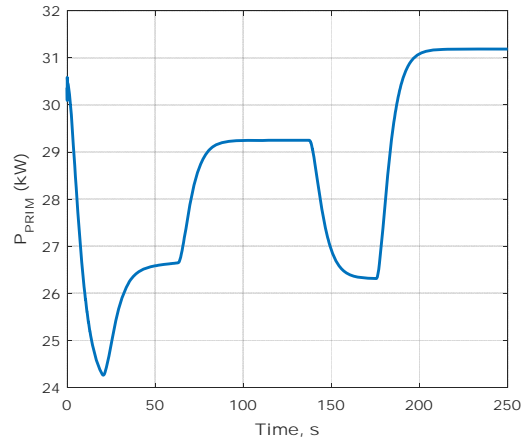
$$i_{grid} = i_{L2\_fil} \quad (28)$$

## РЕЗУЛТАТИ ОТ СИМУЛАЦИИТЕ

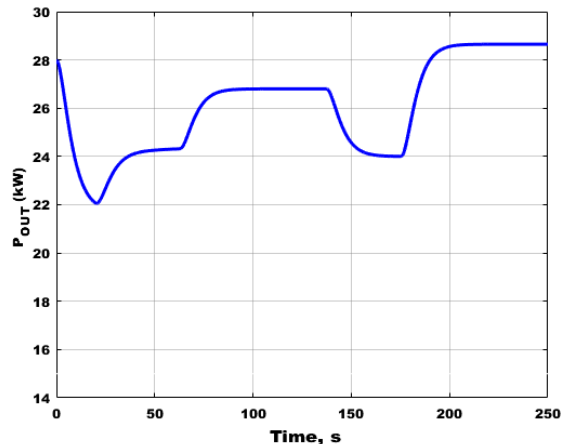
В таблица 1 са дадени параметрите, използвани при симулациите с представения модел. На фиг. 6 е дадена променящата се във времето мощност на първичния двигател, която представлява входна величина на модела. Изходни величини са токовете (съответно мощността) отдавани в мрежата, към която генератора е свързан. На фиг. 7. Е представена мощността, отдавана в мрежата – нейната форма следва тази на мощността на първичния двигател. Моделът и системата за управление обследват коректно заданията – на фиг. 8 е представено напрежението на междинния постояннотокъв кръг, което по задание се поддържа 760 V, за да бъде възможно отдаването на ток в мрежата. На фиг. 9 е се вижда един от фазните токове, отдавани в мрежата.

Таблица 1. Параметри на симулационния модел

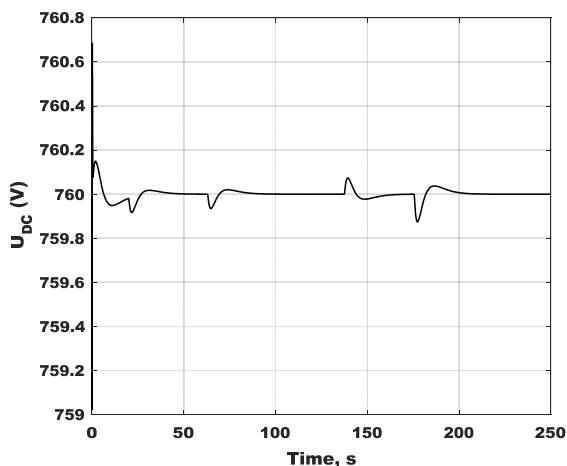
$J$	0,001	$\text{kg.m}^2$
$f_m$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$\text{Nm}/(\text{rad.s})$
$p$	2	—
$L_{s\_d}$	0,7	mH
$L_{s\_q}$	0,7	mH
$R_s$	0,3	$\Omega$
$\Phi_m$	0,05	Wb
$C_{dc}$	5000	$\mu\text{F}$
$R_{Cdc}$	50	k $\Omega$
$L_1$	6	mH
$C_{fil}$	2,2	$\mu\text{F}$
$L_2$	6	mH



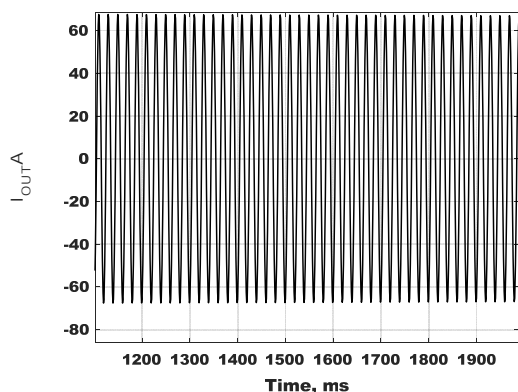
Фиг.6. Мощност на първичния двигател.



Фиг.7. Мощност, отдавана в мрежата.



Фиг.8. Напрежение на междинния постояннотоков кръг.



Фиг.9. Ток, отдаван в мрежата (една от фазите).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е представено моделиране в на газова микротурбина, свързана към трифазна мрежа ниско напрежение. Моделът на преобразователната система съдържа първичен източник, куплиран директно към вала на синхронна машина с постоянни магнити. Връзката на генератора с мрежата се осъществява чрез система от трифазен изправител и инвертор. Филтрирането на хармоничния състав на токовете отдавани в мрежата е осъществено чрез LCL филтър. Проведени са симулации с променяща се във времето мощност на първичния двигател. Резултатите от симулациите потвърждават коректната работа на модела и системата за управление

на преобразувателите в него – управлението изработва и наблюдава коректно заданията за токовете и напреженията на преобразувателите така че отдаваната в мрежата мощност да следва мощността на първичния двигател. Разработеният модел на генератор, свързан към мрежа може да послужи като градивен елемент за моделиране на микро- и наномрежи включващи други други генератори, средства за съхранение на енергия и товари и за изследване на съвместната им работа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването е финансирано по проект „Моделно-базирано проектиране на силови електронни устройства с гарантирани показатели“, Фонд Научни Изследвания, договор ДН07/06/15.12.2016.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liserre, M., T. Sauter and J. Y. Hung. Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, pp. 18-37, 2010
- [2] Ph. Degobert, S. Kreuawan, P Li, B. François, “Reduction of Fast Fluctuations of Power in a Microgrid with Super Capacitors”, ESSCAP’06, Lausanne, Switzerland, Nov. 2006.
- [3] A. Marinov, V. Valchev, G. Nikolov, “Modelling and analysis of  $\mu$ CHP system for domestic use”, ICEST 2011, Nis, Serbia, 29 June 2011, pages 808-812, ISBN:978-86-6125-033-0
- [4] M. Caliano, N. Bianco, G. Graditi, L. Mongibello, “Economic optimization of a residential micro-CHP system considering different operation strategies, Journal of applied thermal engineering, Elsevier, DOI 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.024, 2015
- [5] P. Li ; P. Degobert ; B. Francois ; B. Robyns, “Modeling and Control of a Gas Micro Turbine Generator by Using a Causal Ordering Graph”, Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference, Beijing, China, 4-6 Oct. 2006.