

МЕТОДИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ЕНЕРГИЯ ОТ ВЪЗОБНОВЯЕМИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗТОЧНИЦИ ЗА ПРИСЪЕДИНЯВАНЕ КЪМ МРЕЖА

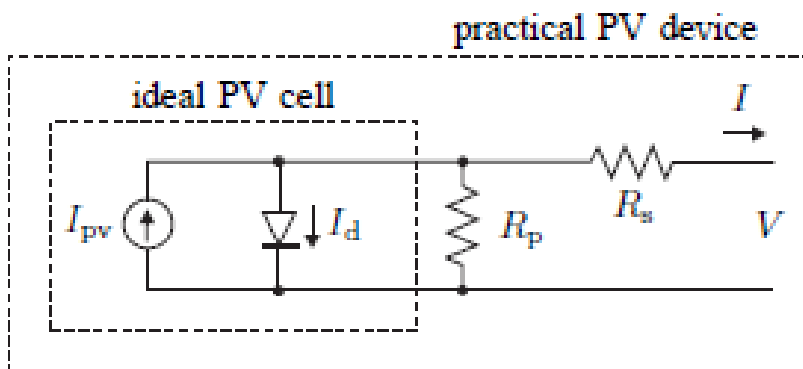
инж. Димитър Кукуригов, гл.ас. д-р Даниел Каров
ТУ – София, ИПФ – Сливен

Анотация: В статията е изградена система за присъединяване на фотоелектричен генератор към мрежа в среда Matlab/Simulink/SimPowerSystems. Изследваната стемата е съставена от следните компоненти: PV генератор, DC/DC повишаващ преобразувател, инвертор, система за управление на инвертора и електрическа мрежа. Резултатите от симулациите са представени под формата на графики.

Keywords: voltage oriented control, grid side inverter control

1. Моделиране на фотоелектричния генератор.

За моделирането на фотоелектричния генератор се използва модел с два резистора R_p и R_s . Заместващата схема на фотоелектричния генератор е представена на фиг. 1. Уравнение (1) е основното уравнение на генератора, което представя неговата волтамперна характеристика:



фиг. 1 заместваща схема на фотоелектричен генератор

$$(1) \quad I = N_p I_{pv} - N_p I_s \left(e^{\left(\frac{V + I \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) R}{N_s a N_{ser}} - 1 \right)} - \frac{V + I \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) R_s}{R_p \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)} \right),$$

където N_{par} и N_{ser} е броят съответно на паралелно и последователно свързаните модули, I – токът произведен от PV генератора, V – напрежението на PV генератора, I_{pv} е токът генериран от слънчевата осветеност, I_s е обратният ток през диода, $a = kT/q$ (k е коефициент на неиделност, k е константа на Болцман ($1.3806503 \times 10^{-23} J/K$), T е температурата в келвини, а q е заряда на електрона ($1.60217646 \times 10^{-19} C$)), N_s - броя серийно съединени клетки в панела.

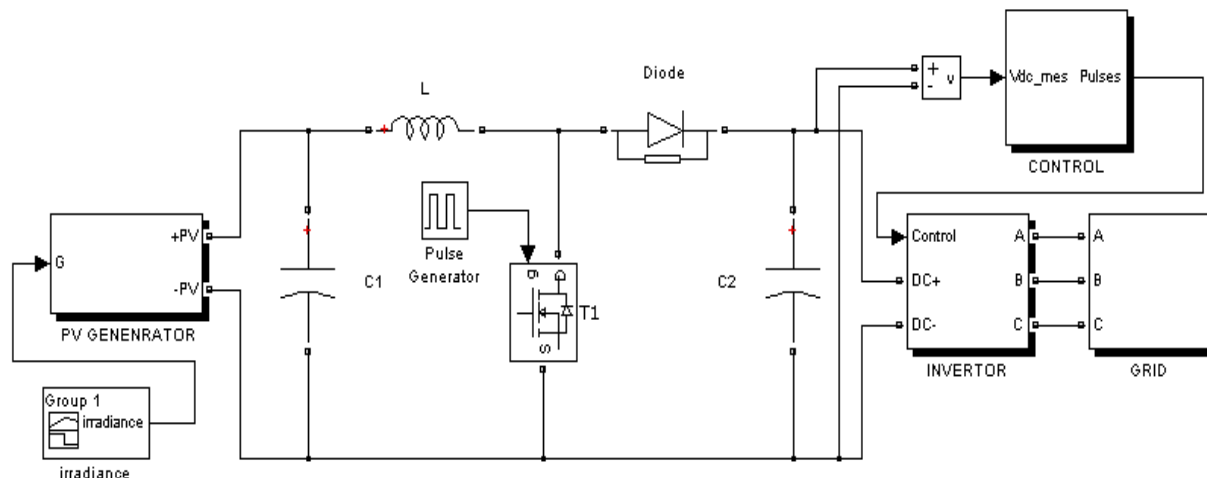
За симулацията ще използваме данните за PV панела BP – SX3195, като

$N_{ser} = 15$, $N_{par} = 2$ ($V_{ocn} = 30.7V$, $I_{scn} = 8.6A$, $V_{mp} = 24.4V$, $P_{max} = 194.2240W$, $N_s = 50$,

$K_i = 0.065\%/^{\circ}C$, $K_v = -111mv/^{\circ}C$), $R_s = 0.3185$, $R_p = 148.8581$.

2. DC/DC повишаващ преобразувател.

На фиг. 2 е показана изследваната система, детайлно е показан DC/DC преобразувателя, който повишава напрежението до нужните граници. След това чрез подходящо управление на мрежовия инвертор се постига синхронизиране на произведения ток с мрежовото напрежение.



фиг. 2 система: PV генератор, DC/DC повишаващ преобразувател, инвертор, система за управление на инвертора, електрическа мрежа

Параметрите на преобразувателя са следните: $L = 5mH$, $C_1 = 100\mu F$, $C_2 = 40\mu F$, тактовата честота на импулсия генератор е $10kHz$ с коефициент на запълване $\alpha = 0.5$. Връзката между входното и изходното напрежение се дава с формулата:

$$(2) \quad U_{out} = \frac{U_{in}}{1-\alpha}$$

2. Моделиране на електрическата мрежа.

Електрическата мрежа е моделирана като източник на трифазно симетрично напрежение [2] с ефективна стойност $220V$ и честота $50Hz$.

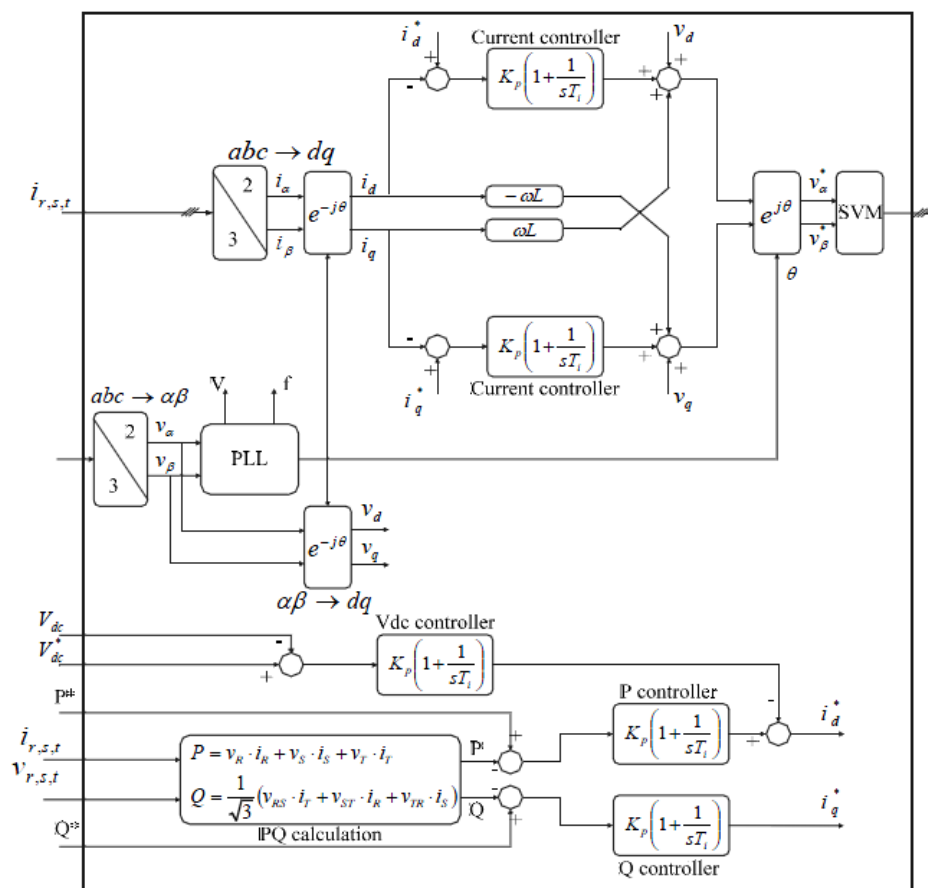
$$(3) \quad V_a = E_m(\omega t), \quad V_b = E_m(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \quad V_c = E_m(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

3. Управление по метода Voltage Oriented Control.

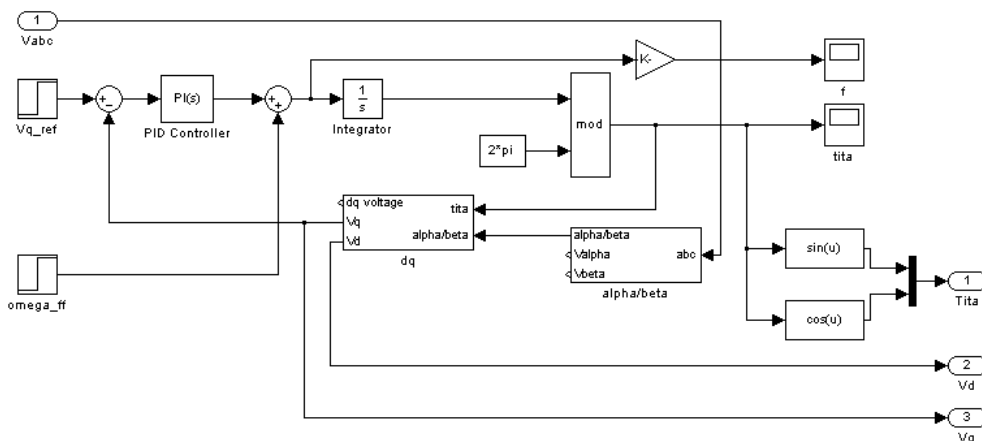
Функционалната схема на управлението е показана на фиг. 3 [2]. При това управление се използва PLL система за определяне на фазата и честотата на мрежовото напрежение. След това трифазното мрежово напрежение се преобразува в dq координатна система с помощта на преобразуването на Парк. Заданието за тока се формира също в dq координатна система с помощта на обратна връзка по напрежение. За формиране на заданието към инвертора се използва PI регулатор на ток. Управлението на инвертора става по метода на векторната широчинна импулсна модулация.

4.1 Система за определяне на фазата и честотата на мрежовото напрежение (PLL).

Структурата на PLL системата е показана на фиг.4 заедно с графиката на фазата на мрежовото напрежение.



фиг. 3 функционална схема на Voltage Oriented Control

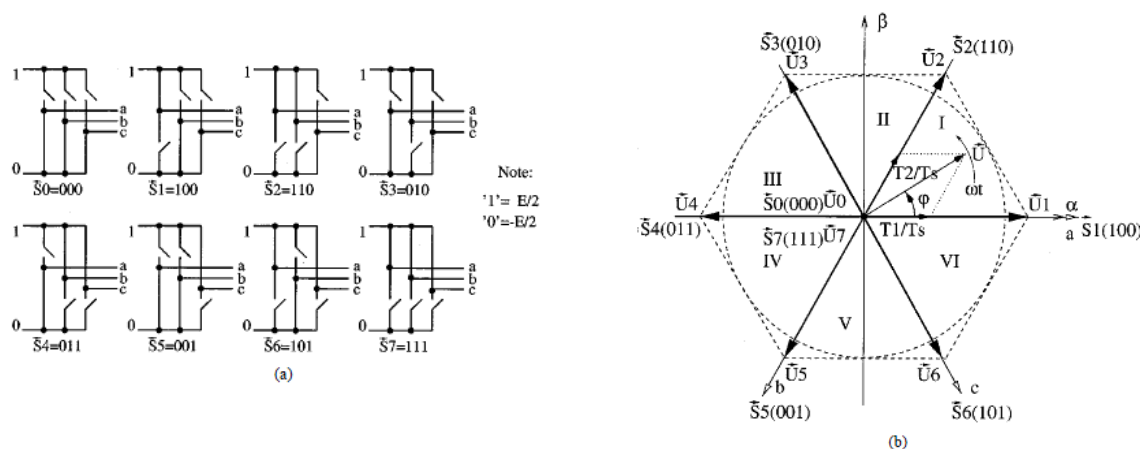


фиг. 4 PLL система

4.2 Векторна широчинно - импулсна модулация (SVWM).

При този вид модулация заданието постъпва към широчинно - импулсия модулатор след (α, β) преобразуване. Известно е, че трифазния инвертор има осом базови състояния, които разделят плоскостта (α, β) на 6 сектора фиг. 5 [3]. Когато заданието V_{ref} се намира в даден сектор то се реализира посредством съответните базови вектори. Например, ако заданието се намира в първи сектор,

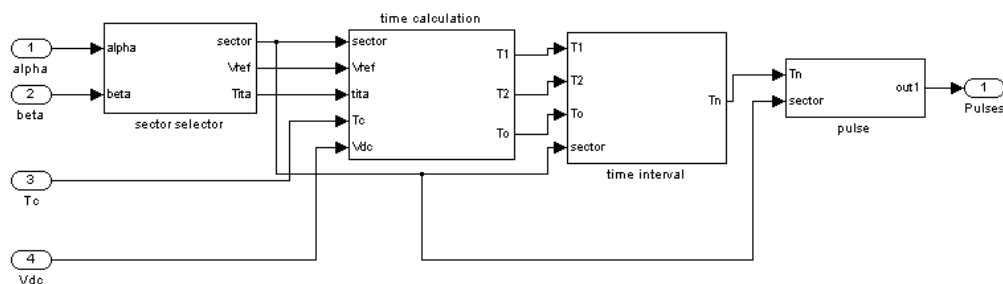
то ще се реализира посредством базовите вектори S_1 и S_2 като инвертора се намира в S_1 за време T_a и в S_2 за време T_b . На фиг. 6 е показана блоковата схема на реализирания алгоритъм.



фиг. 5 Базови състояния а) базови вектори на състоянието б)

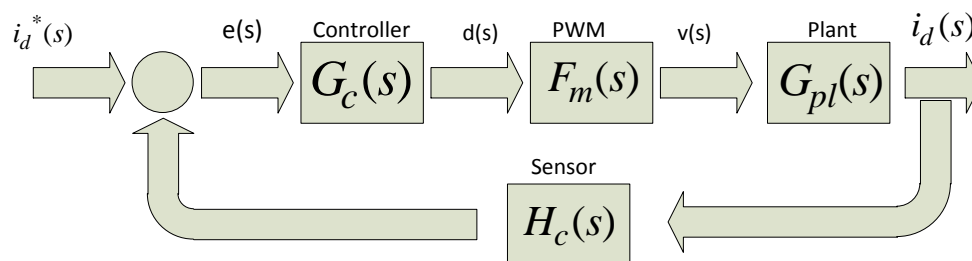
$$(4) \quad T_a = T_c a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta + \frac{n-1}{3} \pi\right), \quad T_b = T_c a \sin\left(\theta - \frac{n-1}{3} \pi\right), \quad T_o = T_c - T_a - T_b$$

където n е номерът на сектора, T_c е периодът на превключване на ключовите елементи, θ е ъгълът, а a е коефициент на модулация, T_o - времето, в което инвертора се намира в нулево състояние.



фиг.6 Алгоритъм векторна широчинно импулсна модулация в Simulink

4.3 Синтез на регулатора по ток и напрежение.



фиг. 6 Контур на обратната връзка по ток

На фиг. 6 е показан контура на обратната връзка по ток, $i_d^*(s)$ е заданието за тока, а $i_d(s)$ е неговата действителна реализация. На блоковата схема присъстват следните предавателни функции.

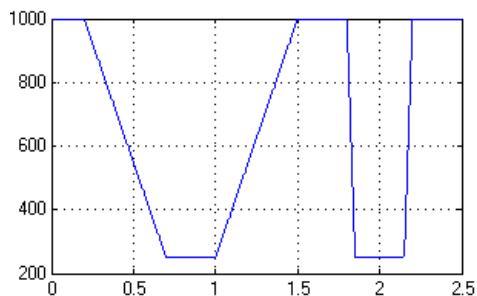
$$(5) \quad G_c(s) = K_p \frac{\tau_{PI}s + 1}{\tau_{PI}s}, \quad F_m(s) = \frac{G_{PWM}}{1 + \tau_{inv}s}, \quad G_{PL} = \frac{k_{PL}}{1 + \tau_{PL}}$$

където τ_{inv} е времеконстантата на инвертора, която зависи от периода на превключване на ключовите елементи, $\tau_{PL} = L/R$ ($L = 44 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, $R = 400 \cdot 10^{-3} \Omega$ - индуктивността и съпротивлението на изхода на инвертора), $k_{PL} = 1/R$. За регулатора получаваме $K_p = 29.3$, $\tau_{PI} = 0.11$.

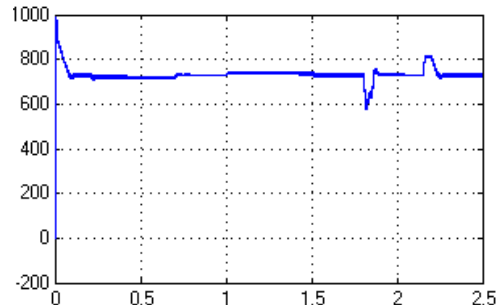
За обратната връзка по напрежение имаме: $K_p = 5 \cdot 10^{-5}$, $K_i = 2.5 \cdot 10^{-5}$.

5. Резултати от проведените симулации.

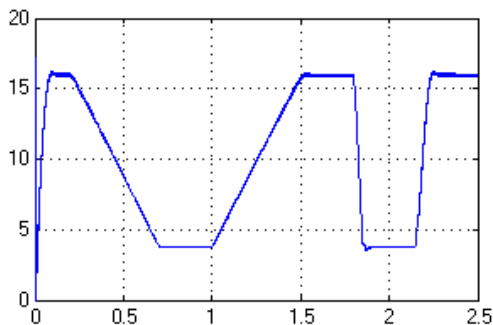
Направни са симулации при промяна на слънчевата осветеност, от графиките за тока виждаме, че той е във фаза с мрежовото напрежение. При номинална осветеност вмъкнатата мощност в мрежата е около 5.70 kW, т.е. близо до максималната, колкото произвежда панелът.



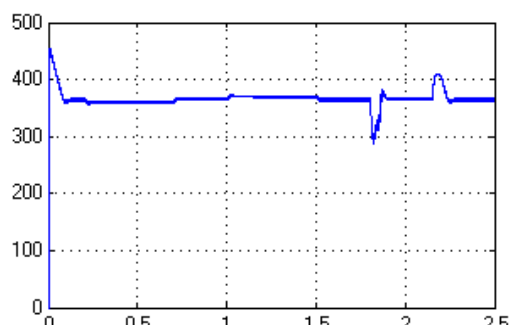
фиг. 7 изменението на слънчевата осветеност



фиг. 8 напрежението на входа на инвертора

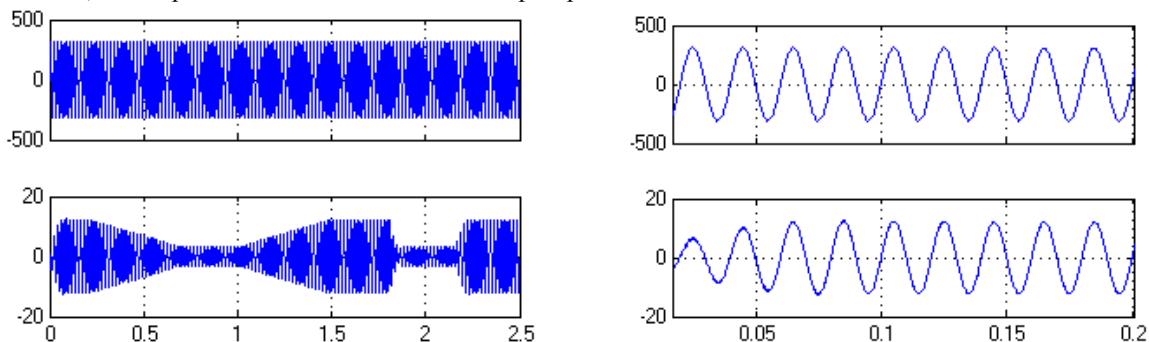


фиг. 9 тока генериран от PV генератора

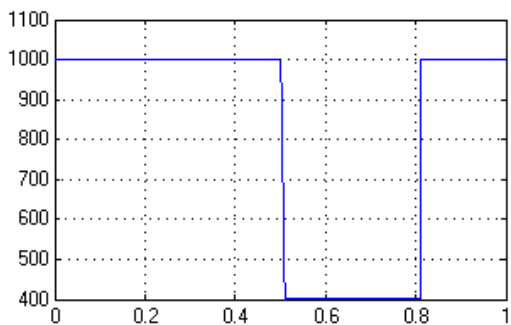


фиг. 10 напрежението на PV генератора

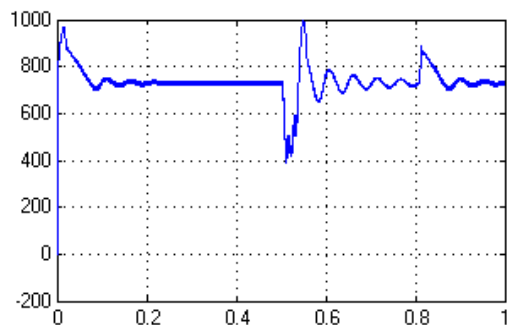
От фиг. 11 виждаме, че мрежовото напрежение и вмъкнатият ток в мрежата са във фаза, от фиг. 8 се вижда, че напрежението остава постоянно при промяна на слънчевата осветеност.



фиг. 11 мрежово напрежение на фаза A и вмъкнатият в мрежата ток

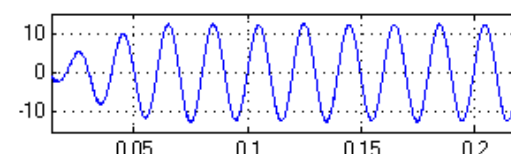
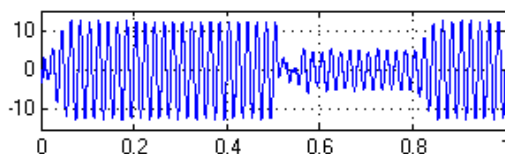
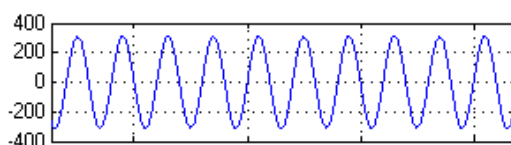
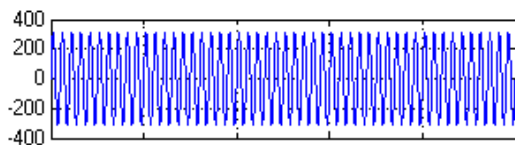


фиг.12 изменението на слънчевата осветеност

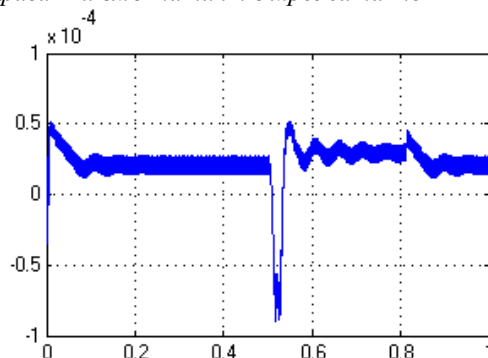
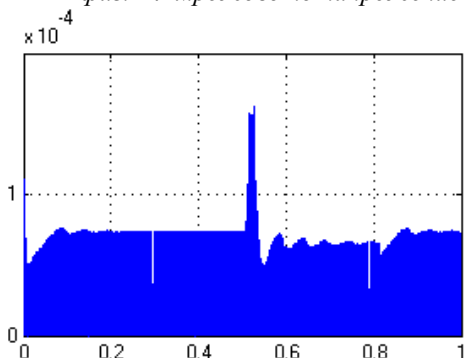


фиг. 13 напрежението на PV генератора

На фиг. 13, 14, 15 са показани резултатите от симулацията при изменение на слънчевата осветеност по начина показан на фиг. 12.



фиг. 14 мрежовото напрежение на фаза А и вмъкнатият в мрежата ток



фиг. 15 времената T_a и T_o

Литература:

1. Черных, И. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink, 2008.
2. Raducu, George. Control of grid side in a B2B configuration for WT Applications, 2008.
3. Keliang Zhou and Danwei. Wang Relationship Between Space -Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis, 2002.
4. Kramer, W., Chakraborty, S., Kroposki, B., Thomas, H. Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems, 2008.
5. Tolunay, B. Space Vector Pulse Width Modulation for Three-Level Converters, 2012.
6. Ruzlani, G., Abdalla, A. Analysis and mathematical modeling of space vector modulated direct controlled matrix converter, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2010.
7. Yougui, G., Zhongjian, L., Control Strategy of Grid Side Converter based on Stationary VOC-PR with PLL, 2012.
8. Hamrouni, N., Chérif, A. Modelling and control of a grid connected photovoltaic system, 2007
9. Makhlouf, M., Messai, F., Modelling and simulation of grid – connected photovoltaic distributed generation system. 2012.