

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНА ЦЕНТРАЛА, ПРИСЪЕДИНЕНА  
НА СТРАНА 20 kV****Красимир Маринов Иванов<sup>1</sup>, Георги Цонев Велев<sup>2</sup>, Петър Колев Петров<sup>3</sup>**<sup>1, 2, 3</sup>*Технически университет - Габрово***STUDY OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT CONNECTED  
TO 20 kV GRID****Krasimir Marinov Ivanov<sup>1</sup>, Georgi Tsonev Velev<sup>2</sup>, Petar Kolev Petrov<sup>3</sup>**<sup>1, 2, 3</sup>*Technical University - Gabrovo***Abstract**

*A study has been made in regard with the regime parameters of a photovoltaic power plant with rated power of 4 MW connected through a 20kV power line to a power substation. The respective power grid has been modeled and simulation results are obtained by the software product Netdraw. Measurement data is provided about the generated current harmonics by the respective PV power plant and the coefficients harmonic distortion are calculated and discussed.*

**Keywords:** photovoltaic power plant, power grid, power quality, electromagnetic compatibility.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

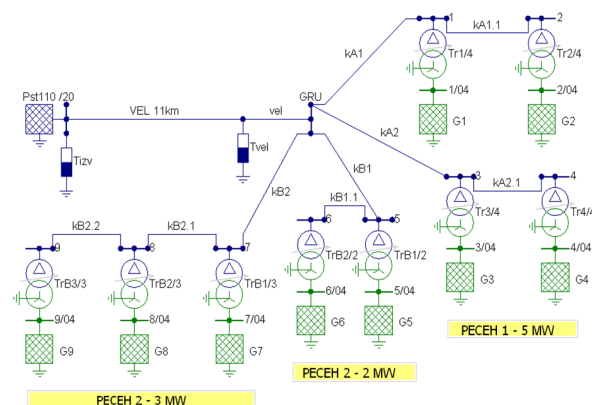
Изграждането на разпределена генерация от възобновяеми енергоизточници се стимулира от много европейски стандарти и съобразените с тях български нормативни документи, имайки за цел увеличаването на дяла на такива източници в общото производство на електроенергия. В изпълнение на приетия от Европейския съвет през 2007 г. пакет от мерки за енергетиката относно изменението на климата, България изпълнява поставената цел през 2020 г. делът на електроенергията, произведена от ВЕИ в страната да достигне 16%. Електроразпределителните мрежи в страната са проектирани за еднопосочно направление на потоците от мощност с необходимата пропускателна способност да доставят на потребителите нужната мощност. През последните години изключително голяма популярност получиха и фотоволтаичните системи за производство на електрическа енергия, присъединени към мрежите за ниско, сред-

но, а при по-голяма инсталирана мощност и към високо напрежение. По-голямата част от ветрогенераторите, мини-ВЕЦ и фотоволтаичните централи се изграждат и присъединяват към електро-разпределителните мрежи и по този начин участват в баланса на електроенергийната система (ЕЕС).

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

Търговската структура на захранването с електрическа енергия играе важна роля в развитието на разпределените генерации. В момента, тези централи се възприемат изключително като производители на електроенергия и не допринасят за останалите функции на електроенергийната система (например за контрол на напрежението, надеждност, резервна мощност, и т.н.). Това се дължи на техническите характеристики на разпределените генерации за електроенергия. Тази ограничена роля на разпределената генерация е предимно причинена от административните и търговските условия,

при които в момента тези източници функционират. Електроразпределителните мрежи са проектирани да приемат електрическата мощност, да я трансформират и да пренасят до клиентите. Промяната в активните и реактивните мощности, причинени от разпределената генерация, има важни технически и икономически последици за захранващата система. Като цяло, възприетият подход е да се гарантира, че всяка разпределена генерация не влошава качеството на ел. енергия, надеждността на електроснабдяване на консуматорите, а възобновяемите генерации се разглеждат като "отрицателен товар". Поради конструктивни причини разпределената генерация може да влоши качеството на електроенергията в мястото на присъединяване към електрическата мрежа, като причинява колебание на напрежението, увеличаване на хармониците, поява на фликер, динамично изменение на потокоразпределението и има отрицателен ефект върху устойчивостта на системата при смущения и след аварийни режими. Същевременно, разпределената генерация често предизвиква изменение в мощността на работещите блокове на ТЕЦ, което смущава нормалния режим на работа на оборудването, пречиствателните инсталации и може да има обратен екологичен ефект. Централите на разпределена генерация у нас не могат да участват пълноценно в първичното и вторичното регулиране на честотата и междусистемния обмен на мощност в ЕЕС. На тях не може да се разчита за противоаварийно управление на ЕЕС и възстановяване на ЕЕС след тежки аварии. Когато има промени в скоростта на вятъра или в интензитета на слънчевата светлина, тяхната мощност е трудно предвидима, особено по отношение на планиране и прогнозиране на товарите, т.к. е трудно да се предвиди в дългосрочен план наличието на вятър и слънчева светлина. В настоящият доклад е разгледана работата на фотоволтаична централа, присъединена към електропровод 20 kV. Работата на централата е симулирана с програмата Netdraw.



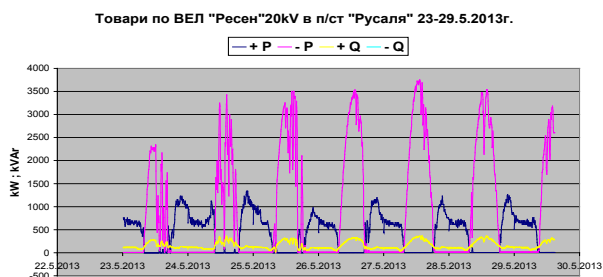
Фиг. 1. Схема на свързване на фотоволтаична централа

На фиг. 1 е представена моделираната схема на фотоволтаичните централи (с всяка една от техните съставни части), електропровода, подстанцията и съответните товари. Тъй като електропроводът е с много консуматори, за улеснение те са симулирани като един обобщен товар. По аналогичен начин с един общ товар са представени и останалите изводи на подстанцията. Подстанцията е представена като мрежа, която има шинна система на страна 20 kV. На схемата са представени свързващите кабели на страна 20 kV, а отделните стрингове на фотоволтаичната централа са въведени като генериращи източници на страна 0,4 kV.

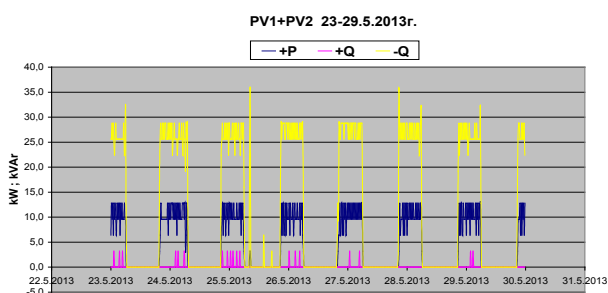
## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОТОКО-РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МРЕЖА В РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ

Използвайки данни от електромерите на двете фотоволтаични централи и тези от електромера на електропровода в подстанцията, са разработени графики, чрез които е показано реалното разпределение на мощностите във времето. На графиките с  $+P$  е означена купената (консумирана) активна мощност, а с  $-P$  е означена продадената (генерирана) активна мощност. Съответно с  $+Q$  е означена купената реактивна мощност и с  $-Q$  е продадената реактивна мощност. За съкращаване на надписите по диаграмите с PV1 е означена ФЕЦ „Ресен 1” и с PV2 - ФЕЦ „Ресен 2”.

На фигури 2 и 3 са показани мощностите за периода от 23 до 29 май. На фиг. 3 са купените активна, реактивна и продадена (генерирана) реактивна мощност от централите.



Фиг. 2. Изменение на мощността на централата



Фиг. 3. Купени мощности от централите

От представените графики се вижда как се изменят мощностите във времето. През деня електроцентралите отдават само активна, а реактивна мощност е нулева. В тъмните периоди на денонощието, когато преустановят отдаването на активна мощност, електроцентралите консумират малки количества активна енергия. PV1 консумира повече активна енергия спрямо PV2. Консумацията на реактивна енергия от PV1 има няколко пика за разглеждания период. PV2 за същия период не консумира реактивна мощност, но за сметка на това отдава такава и то в значително по-големи количества спрямо PV1. Централите отдават активна мощност в периода от 06:00 до 20:45 часа. Разликата между отдадената от централите и върнатата по електропровода енергия в подстанцията, представлява сума от консумираната енергия и загубите на енергия в електропровода.

Изчислените активни загуби по електропровода са ( $\Delta P_{vel} = 0.55\%$  и  $\Delta P_{VEL} = 6.86\%$ )  $\Delta P = 7.41\%$ .

Сравнявайки направените изчисления, когато няма генерация, потоците на актив-

на и реактивна мощност са насочени от преносната мрежа 110 kV към изводите на подстанцията. Електроцентралите отдават реактивна капацитивна мощност по електропровода, която в случая се явява полезна, тъй като покрива отчасти консумираната реактивна мощност от електропровода и консуматорите, присъединени към него, подобрявайки  $\cos\phi$ .

Когато има генерация, централите отдават само активна енергия. Потоците на реактивна мощност запазват посоката си, а големината им зависи от изменението на товарите. Генерираната активна мощност започва да се изразходва от товара на електропровода, при което потокът на активна мощност от подстанцията към електропровода намалява. Влошава се  $\cos\phi$  на електропровода, при което се увеличават загубите на активна мощност в потока от подстанцията до товара. С увеличаване на генерираната активна мощност от електроцентралите, когато се покрие товара на извода, потокът започва да се изразходва в другите изводи на подстанцията. Тогава двата потока активни мощности (от мрежата на 110 kV и генерираната) се обединяват в посока към останалите изводи. Когато генерираната активна мощност е по-голяма от консумираната от изводите на подстанцията, потокът се пренасочва и отдава към мрежата 110 kV. При тази ситуация потоците на активна и реактивна мощност в цялата мрежа са насочени в противоположни посоки. С увеличаване на генерираната активна мощност се намалява консумираната от захранващата мрежата 110 kV такава, при което се понижава и влошава  $\cos\phi$  на подстанцията.

Изменението на напрежението по електропровода в режим на генерация се увеличава с увеличението на генерираната мощност, но също така зависи и от товариите по извода. Когато потребяваната реактивна мощност е по-голяма, увеличението на напрежението е по-малко.

Разработените варианти са при  $\cos\phi=1$  в ГРУ, т.е. отдаване само на активна мощност в точката на присъединяване към електроразпределителната мрежа. При работа на централите с  $\cos\phi \neq 1$  има увеличен пренос на реактивна мощност. Инверторите

могат да се настроят да работят с  $\cos\phi$  (от +0.9-индуктивен до -0.9-капацитивен).

При работа с капацитивен  $\cos\phi$ , потокът реактивна мощност е съпосочни с този на активната мощност, отдавана от централите (напрежението е най-високо). При индуктивен  $\cos\phi$ , централите се явяват консуматор на реактивна мощност и потоците са разнопосочни (напрежението е по-ниско от опорното). С увеличаване на генерираната активна мощност се повишава и напрежението при източника. Посоките и големините на потоците на активна и реактивна мощност оказват влияние на изменението на напрежението. Когато потоците са съпосочни увеличението на напрежението е най-голямо. При разнопосочни мощности изменението на големината на напрежението е най-малко.

Независимо от посоката на мощностните потоци загубите при пренасяне на активна мощност допълнително се увеличават, когато има наличие на реактивни мощности.

Имайки в предвид, че генерацията на мощност пряко зависи от метеорологичните условия, появата на облачност води до спад в производството. То от своя страна води до намаляване на напрежението в електропровода. Всяко по-голямо изменение на генерираните мощности води до изменение на напрежението, което се усеща най-вече от потребителите, присъединени в близост до електроцентралите.

Най-неблагоприятен за електропровода и централите се явява режимът с максимална генерация и понижена консумация, при който напрежението може да превиши допустимите стойности.

## **ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ПРОИЗВЕЖДАНАТА И КОНСУМИРАНАТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ ОТ ФОТОВОЛТАИЧНАТА ЦЕНТРАЛА ПРИ РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ**

Електрическата енергия е продукт и както всеки друг продукт, трябва да отговаря на съответните изисквания за качество [2]. Качеството на електрическата енергия е регламентирано в [1].

Отклонението на напрежението е в нормите. На фиг. 4 – фиг. 6 е представена връзката между тока от фазите в процентно от-

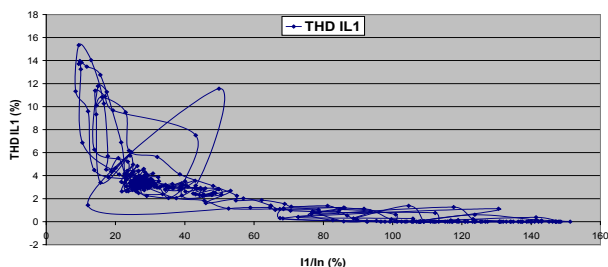
ношение и съответните им коефициенти на несинусоидалност, което показва как се изменя THDI спрямо натоварването.

От направените изследвания се вижда, че показателите за качеството на електрическата енергията: честотата и отклонение на напрежението са в нормите. При колебанието на напрежението има превишаване на стойностите над допустимите норми. При коефициента на несинусоидалност положението е по-различно. Забелязва се ритмично присъствие на хармонични изкривявания с пикове в началото и края на всеки повтарящ се период. От вечерта до сутринта, когато инверторите са в режим на изчакване и при малки генерирани мощности, има постоянно наличие на хармоници в мрежата. В режим на генерация, когато централите започнат да отдават активна мощност, която изцяло покрива консумацията по електропровода – хармоничните изкривявания в подстанцията не присъстват, но въпреки това се появяват в моменти, когато има рязко изменение на генерираните мощности. Най-високи са нивата на хармонични изкривявания в моментите, когато необходимата мощност за консуматорите на извода се доставя едновременно от подстанцията и електроцентралите. Времето с превишени нива на хармонични изкривявания сутрин и вечер е в порядъка на 30-50 минути.

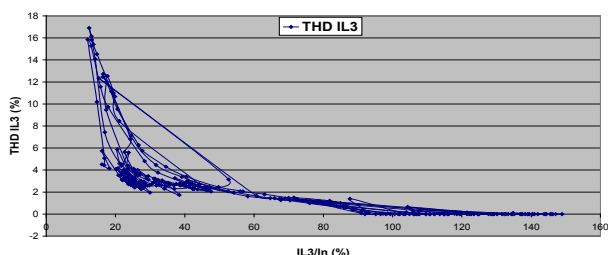
Отчетените резултати от анализатора при електроцентралата са представени в следващите фигури и представляват запазени снимки от екрана на „Fluke 434”. На фиг. 7 е показан спектърът на присъстващите хармоници в напрежението. На фигури 8 до 9 е изменението на 3-ти, 5-ти и 7-ми хармоник в тока по фази за периода на измерване. Съпоставено с товарите графици по време, появата на високи нива на хармоници в тока започва с прекратяване отдаването на активна мощност в точката на присъединяване – THDi достига над 110%. В режим на генерация хармониците в кривите на тока и напрежението също присъстват, но стойностите им са до 1%, което е под допустимите 8%.

При извършения анализ на получените резултати от уредите се констатира, че качеството на произвежданата и купуваната

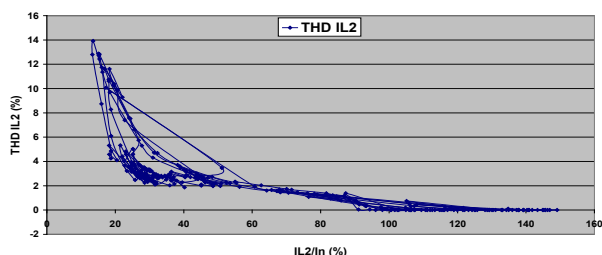
електроенергия от електроцентралата при различните режими по отчетените показатели отговаря на характеристиките [3].



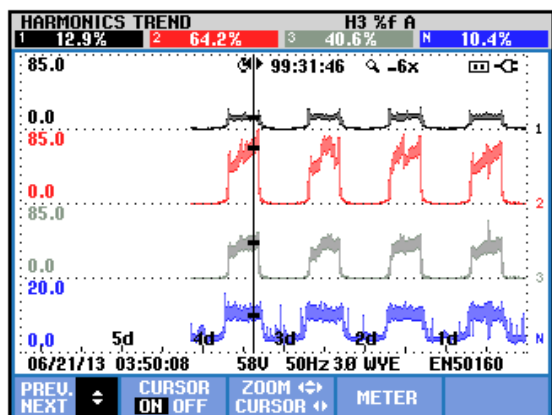
Фиг. 4. Изменение на THDI за фаза L1 от натоварването



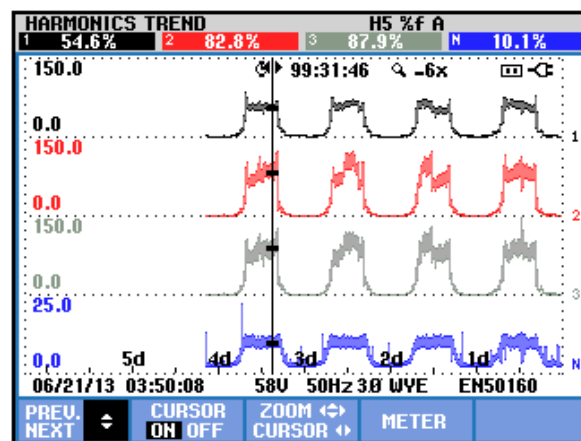
Фиг. 5. Изменение на THDI за фаза L2 от натоварването



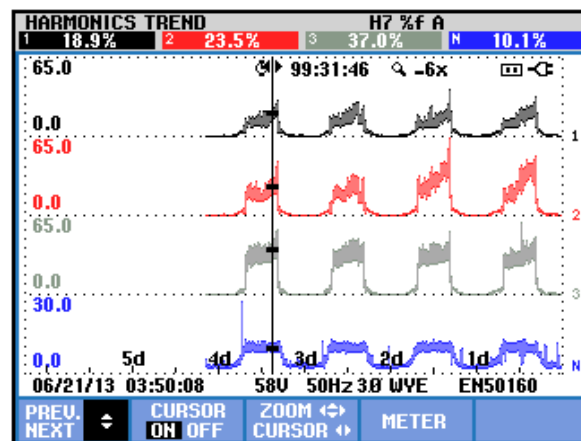
Фиг. 6. Изменение на THDI за фаза L3 от натоварването



Фиг. 7. Изменение на третата токова хармонична по фази



Фиг. 8. Изменение на петата токова хармонична по фази



Фиг. 9. Изменение на седмата токова хармонична по фази

Изследваната ФЕЦ, присъединена на средно напрежение, е изградена със съоръжения на водещи фирми в бранша и произ-

вежда качествена електроенергия. Въпреки насърчаващата политика за изграждане на нови мощности трябва да се отчетат и страничните ефекти от тяхното присъединяване. При направеното изследване на потоко-разпределението в мрежата се установи, че в режим на генерация се понижава  $\cos\phi$  на електропровода и подстанцията, което води до увеличение на загубите при пренос на активна мощност на ЕРП и НЕК. Фотоволтаичната централа оказва влияние на изменение на напрежението по електропровода, към който е присъединена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произвежданата електроенергията е качествена в режим на генерация, но в режим на изчакване се генерират и малки количества реактивна капацитивна енергия с високи нива на хармонични изкривявания в кривите на тока, които присъстват в мрежата. При захранване на електропровода

едновременно от подстанцията и ФЕЦ, възниква допълнително генериране на хармоници.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] BDS EN 50160 “Harakteristiki na naprezhenieto na elektricheskata energia, dostavyana ot obshtestvenite elektricheski mrezi”

[2] Schlabbach J. D. Blume and T. Stephan Blome Voltage Quality in Electrical Power Systems, IET, 2000, p. 253.

[3] Gregorio Romero, Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data, InTech, 2011.

[4] Ivanov K. M., Iv.M.Stojanov: STUDY OF 6 KV NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series, Vol.4, 2014, Romania, ISSN 1842-4856