

Относно съвременни методи за оценка на електромагнитната съвместимост на стационарни фотоволтаични системи

Любен Илиев, Николай Пантелеев, Николай Михайлов

Modern methods for evaluation of electromagnetic compatibility of stationary photovoltaic systems. *The paper defines the problems with the electromagnetic compatibility (EMC) of the modern photovoltaic (PV) systems and the most widely used methods for computational electromagnetic for modeling and simulation of such systems. The article includes also a review of the most popular software products for electromagnetic simulations and their relevance to the PV systems.*

Key words: *Photovoltaic system, computational electromagnetic, electromagnetic compatibility, simulation, modeling*

ВЪВЕДЕНИЕ

Броят на фотоволтаичните инсталации в световен мащаб бележи значителен ръст през последните години [1,2]. Това предизвиква редица проблеми: заемане на земни площи, трудно свързване към хранващата мрежа при инсталиране на недостъпни места и др. [3]. Поради своите големи размери и мощност, соларните паркове изискват голяма инвестиция за тяхното построяване и попадат под държавни регулаторни норми, което ги прави трудно изпълними [4]. Малките фотоволтаични системи (ФВС), до няколко kW, монтирани върху вече съществуващи сгради имат редица преимущества; те практически не заемат земни площи, тъй като обикновено се монтират върху покривите или стените на сградите, разходите за тяхното изграждане са малки, поради което ФВС с малка мощност са много разпространени и техният брой се увеличава непрекъснато [5,6].

Соларните системи са чувствителни към външни електромагнитни смущения (мълнии, електромагнитни полета, смущения по хранващата мрежа и заземителните системи), които могат да доведат до краткотраен отказ или до повредата им. [7]. Тези инсталации обикновено се използват в жилищни сгради, офиси и промишлена среда, което поставя към тях високи изисквания от гледна точка на действащите стандарти за електромагнитна съвместимост (EMC) [8,9,10,11]. Очевидно при проектирането и производството на ФВС е необходимо да се вземат необходимите мерки за осигуряване на тяхната EMC .

Поради високите разходи за тестове на прототипи за EMC и продължителното време за тяхното провеждане, много от проектантите на електронни системи предпочитат да използват софтуер за симулиране на работата на устройствата още на етапа на тяхната разработка. Този подход има редица предимства пред изпитването на реални физически устройства:

1. Грешки при проектирането могат да бъдат открити още при разработката на принципните схеми и проектирането на платките;

2. Лесно се проверява влиянието на различните апаратни и конструктивни методи за осигуряване на EMC;

3. Не е необходимо да се извършват серия от изпитания на принципа „проба-грешка“, което оскъпява и забавя проектирането, особено ако се използва външна лаборатория.

Целта на настоящия доклад е да се направи анализ на методите и предлаганите на пазара софтуери за оценка на електромагнитна съвместимост на електронни и електротехнически съоръжения и възможността за тяхното приложение при проектирането на фотоволтаични системи.

Устройство на малка стационарна ФВС

Устройството на малка стационарна ФВС е показано на фиг. 1. Тя се състои от фотоволтаичен панел (ФВП), контролер за зареждане на батерия, инвертор и свързващи проводници.



Фиг. 1 Устройство на базова стационарна фотоволтаична система

ФВП имат голяма площ, разположени са на открито и са чувствителни към електромагнитни смущения в резултат на мълнии. Това налага използването на компоненти, които осигуряват защита на цялата система, което предполага изследване влиянието на тези компоненти, още на етапа на проектирането им [12].

Инверторите са изградени от активни ключови елементи с високо бързодействие, който комутират големи напрежения и токове и следователно са източник на излъчени и кондуктивни електромагнитни смущения (ЕС). За да се подобри EMC, на входа и изхода им се поставят филтри за намаляване на кондуктивните смущения и се екранират. Правилното проектиране на тези филтри има голямо значение за устойчивата работа на системата и за доказване на съответствието и с изискванията за EMC [13,14].

Контролерите за зареждане, както и другите системи за управление, които в общия случай се използват в една ФВС, трябва също да бъдат устойчиви на ЕС и да не излъчват смущения. При разработването на една ФВС е важно да се вземе предвид и влиянието техните проводници, тъй като те са основен път за разпространение на електромагнитната енергия.

Методи за симулиране

Съществуват различни математически методи за симулиране на електромагнитни явления, като тяхната основната задача е да дискретизират триизмерните обекти и отчитайки свойствата на материалите, от които са изградени, да изследват тяхното поведение при електромагнитно въздействие. Всички методи се базират на уравненията на Максвел за електромагнетизма, като всеки от тях представлява различен подход за решаването на тези уравнения. Използването на различни методи се налага, поради разнородността на изследваните обекти, техните размери, физически свойства и конструктивна сложност, както и широките честотни и енергийни граници на изследване. [15,16]

Базовите методи са:

- метод на крайните разлики във времевата област (Finite-Difference Time-Domain method – FDTD) [17,18];
- метод на крайните елементи (Finite Element Method – FEM) [19,20];
- метод на моментите (Method of Moments – MoM / Boundary Element Method – BEM) [21,22].

Характеристиките на основните методи са показани в табл. 1., като са посочени техните предимства и недостатъци, както и целесъобразността им за използване в симулирането на ФВС. Тези методи са универсални и не са много ефективни за повечето практически симулации, поради което са разработени множество техни разновидности (хибридни методи). Хибридни методи са тясно специализирани и много ефективни за определени обекти, като разликите между тях основно са

свързани с начина на дискретизиране на обектите, начина на решаване на уравненията на Максвел и областта на приложение (времева или честотна). [23]

Таблица 1
Характеристиките на основните методи за симулиране

Метод	Преимущества	Недостатъци	Приложение за ФВС
FDTD	<ul style="list-style-type: none"> • Симулиране на големи, нехомогенни и сложни структури • Ефективна работа при паралелни процеси 	<ul style="list-style-type: none"> • Разделяне на изследваната структура на голям брой малки клетки • Трудност за симулиране на малки и големи обекти в една структура • Необходими са гранични условия 	<ul style="list-style-type: none"> • Симулиране на ФВП • Симулиране на екрани на инвертори
FEM	<ul style="list-style-type: none"> • Симулиране на нехомогенни и сложни структури • Симулиране на малки и големи обекти в една структура 	<ul style="list-style-type: none"> • Необходими са гранични условия • Трудно симулиране на тънки проводници 	<ul style="list-style-type: none"> • Симулиране на печатни платки • Симулиране на екрани на инвертори
MoM/ BEM	<ul style="list-style-type: none"> • Ефективно симулиране на проводими материали • Ефективно определяне на излъчвания в пространството 	<ul style="list-style-type: none"> • Усложняване при увеличаване на честотата • Трудности при нехомогенни структури 	<ul style="list-style-type: none"> • Симулиране на проводници и печатни платки

Някои от най-разпространените хибридни методи са:

- матричен метод на предавателна линия (Transmission Line Matrix Method – TLM). Метод близък до FTDT, който се използва при симулиране на големи, нехомогенни и сложни структури във времевата област. Той е ефективен при паралелни процеси. [24];
- метод на частично еквивалентна схема (Partial Element Equivalent Circuit - PEEC). При него обектите се дискретизират, като капацитети, индуктивности и съпротивления и се симулират подобно на схематичен модел, което ускорява симулирането на печатни платки. [25,26];
- метод на крайните разлики в честотната област (Finite Difference Frequency Domain - FDFD). Представява комбинация от FEM и FDTD и се използва за симулиране на нехомогенни и сложни структури в честотната област. [27];
- метод на крайните елементи във времевата област (Finite Element Time Domain - FETD). Комбинира методите FEM и FDTD, поради което е подходящ за симулиране на нехомогенни и сложни структури във времевата област. [28];
- метод на крайните обеми във времевата област (Finite Volume Time Domain - FVTD). Подобен е на FTDT, но с по-голяма гъвкавост при дискретизирането на симулираната структура. Ефективен е при нехомогенни и сложни структури във времевата област. [29];
- метод на крайната интеграция (Finite Integration Technique - FIT). Този метод е модификация на FDTD. Ефективен при симулиране на нехомогенни и сложни структури във времевата област. [30];
- метод на Галеркин на прекъсванията в времевата област (Discontinuous Galerkin Time Domain - DGTD). Произхожда от FDTD и е подходящ за симулиране на нехомогенни и сложни структури във времевата област. [31];

- метод на разлагане на областта (Domain Decomposition Method - DDM). Представява комбинация между FEM и FDTD. При него симулираната структура се разделя на отделни области и за всяка област се прилага най-ефективния алгоритъм. Много ефективен е при паралелни системи. [32];
- метод на разлагане на спектъра (Spectral Decomposition Method - SDM). Разработен е, като комбинация между FEM и FDTD. При него изследваният честотен спектър се разделя на части, като се осъществява паралелно пресмятане на всяка част. Много е ефективен при паралелни системи. [33];
- метод на физическата оптика (Physical Optics PO). Представява разновидност на MoM. Основно се използва за симулиране на големи структури в честотната област. Използват се методи от оптиката. [34];
- Метод на геометричната оптика (Geometrical Optics GO). Също е разновидност на MoM и е ефективен при симулиране на големи структури в честотната област. Използват се методи от оптиката. [35].

Анализ на софтуерни продукти за симулация

На пазара съществуват много на брой софтуерни продукти за симулация, различаващи се по обектите за симулиране, методите които използват, възможността за симулиране на цели системи или части от тях. Анализ на най-известните софтуерни продукти и възможността им за симулиране на определени компоненти от ФВС е представен в табл. 2.

Преди провеждане на симулация е необходимо да се подбере подходящ метод, за да се получат коректни резултати. В противен случай резултатите могат да бъдат подвеждащи, като времето и ресурсите необходими за провеждане на симулацията могат да нараснат многократно. Затова повечето софтуерни продукти предлагат програмни съветници, в които потребителя дефинира системата, която ще се симулира и му се предлагат най-оптималните методи. [36]

Таблица 2
Описание на софтуерни продукти за симулиране

Наименование	Фирма производител	Описание	Испол-звани методи	Приложение за ФВС
CST Studio	Computer Simulation Technology	Интегрирани модули за свързано симулиране на схематични модели, печатни платки, проводници и корпуси	FDTD, TLM, PEEC, FIT, MoM, MLFMM	Възможност да се симулира цялостна ФВС за излъчвания и възприемчивост
EMPro; Advanced Design System	Agilent Technologies	Отделни софтуерни продукти за свързано симулиране на схематични модели, печатни платки, проводници и корпуси	FDTD, FEM	Възможност да се симулира цялостна ФВС за излъчвания и възприемчивост
HFSS; DesignerSI; DesignerRF SIWave	ANSYS	Отделни софтуерни продукти за свързано симулиране на схематични модели, печатни платки, проводници и корпуси	FEM, MoM, DGTD, DDM, SDM	Възможност да се симулира цялостна ФВС за излъчвания и възприемчивост
HyperLynx 3D EM	Mentor Graphics	Симулиране на печатни платки и антени	MoM	Симулиране на печатните платки на инвертора и

				контролерите
XFDTD	Rem-com Inc.	Симулиране на триизмерни структури за електромагнитни излъчвания и възприемчивост	FDTD	Симулиране на ФВП Екрани на инвертори
Sonnet	Sonnet Software Inc.	Симулиране на печатни платки и триизмерни структури за електромагнитни излъчвания и възприемчивост	MoM	Симулиране на печатните платки на инвертора и контролерите
FEKO	EM Software & Systems-S.A. (Pty) Ltd	Симулиране на триизмерни структури за електромагнитни излъчвания и възприемчивост Симулиране на много големи обекти.	FEM, MoM, MLFMMUTD, GO, PO	Симулиране на ФВП Екрани на инвертори

Цената на софтуерните продукти показани в табл. 2 варира в широки граници, от 1000 \$ до над 100 000 \$ в зависимост от избраните модули и методи за симулиране. Предлагат се и безплатни продукти, но те в повечето случаи са с намалена функционалност и поддръжка. [37,38,39,40,41,42,43,44]

Системни изисквания на софтуерни продукти за симулация

Симулирането на електромагнитни явления се базира на сложен математически апарат и това налага използването на мощни компютърни системи. При нископроизводителни компютри, времето за симулация със средна сложност може да отнеме денонощия, което е неприемливо. Повечето методи се изпълняват много ефективно с паралелни процеси и използването на мултипроцесорни или многоядрени системи, с голяма памет, който намаляват в пъти времето за изпълнение [45,46,47]. За симулиране на големи, сложни и нехомогенни обекти, в някои случаи се налага използването на персонални суперкомпютри, които са специализирани в извършването на паралелни изчисления. Тези системи са достъпни на пазара за обикновените потребители. [48,49,50]. Някои от софтуерните продукти позволяват изчисленията да се разпределят на няколко компютъра, свързани в локална мрежа [51].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статията са анализирани основни методи за симулиране на електромагнитни явления, както и някои от най-използваните софтуерни продукти в тази област. Посочени са техни предимства и недостатъци.

2. Изборът на софтуер за симулация на ФВС зависи от математическите методи които софтуера използва. С цел оптимизация на резултатите от симулацията при различни обекти, за предпочитане е използването на софтуер, който може да извършва симулации, като използва различни методи.

3. При използването на софтуерни продукти, за да се съкрати времето за симулация е необходимо да се използват мултипроцесорни или многоядрени персонални компютри.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Masson G., Latour M., Biancard D., Global market outlook for photovoltaics until 2016, EPIA, 2012, pp. 76
- [2] International Renewable Energy Agency, RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES, 2012, pp. 52
- [3] Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V., Environmental impacts from the solar energy technologies, Elsevier, 2003, pp. 8
- [4] EPIA, PV Power Plants 2012, EPIA, 2012, pp 108

- [5] Findley D., Solar power for your home, The McGraw-Hill, 2010, pp. 209
- [6] U.S. Department of energy, Solar Technologies Market Report, 2011, pp. 136
- [7] Bendel C., EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems, 2002, pp. 127
- [8] БДС EN 61000-6-1:2007, Електромагнитна съвместимост (EMC) –Част 6-1: Общи стандарти. Раздел 1: Устойчивост на смущаващи въздействия за жилищна, търговска и лекопромишлена среда
- [9] БДС EN 61000-6-2:2007, Електромагнитна съвместимост (EMC) –Част 6-2: Общи стандарти. Раздел 1: Устойчивост на смущаващи въздействия за промишлена среда
- [10] БДС EN 61000-6-3:2007, Електромагнитна съвместимост (EMC) –Част 6-3: Общи стандарти. Раздел 3: Стандарт за излъчване жилищна, търговска и лекопромишлена среда
- [11] БДС EN 61000-6-4:2007, Електромагнитна съвместимост (EMC) –Част 6-4: Общи стандарти. Раздел 3: Стандарт за излъчване на промишлени среди
- [12] Arndt A., Puto R., Basic Understanding of IEC Standard Testing for Photovoltaic Panels, In Compliance magazine, 04/2010, pp. 52
- [13] Hamza D., Jain P., Conducted Electromagnetic Emissions Analysis in Grid-tied PV System, 2009, EMC'09/Kyoto, pp. 4
- [14] Jiang Q., Brown J., EMC Improvement of Grid Connected PV Inverters, pp. 6
- [15] Govan D., Bekker E., Computational Electromagnetics: Current Applications and Future Trends, 2004, pp. 10
- [16] Sykulski J. K., Computational electromagnetics for design optimization: the state of the art and conjectures for the future, BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES, Vol. 57, No. 2, 2009, pp. 9
- [17] Sullivan D., Electromagnetic simulation using the FDTD method, IEEE Press, 2000, pp. 176
- [18] Teixeira F., Time-Domain Finite-Difference and Finite-Element Methods for Maxwell Equations in Complex Media, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 56, NO. 8, AUGUST 2008, pp. 17
- [19] Logan D., A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition, Thomson, 2007, pp. 836
- [20] McFee S., Giannacopoulos D., Introduction to Adaptive Finite Element Analysis for Electromagnetic Simulations, McGill University, pp. 10
- [21] Gibson W., The Method of Moments in Electromagnetics, Chapman & Hall/CRC, 2007, pp. 288
- [22] Hall A., Generalized Method of Moments, Oxford University, 2005, pp. 413
- [23] Davidson D., Computational electromagnetics for RF and microwave engineering, Cambridge University Press, 2005, pp. 433
- [24] Christopoulos C., The Transmission-Line Modeling Method in Electromagnetics, Morgan and Claypool Publishers, 2005, pp. 100
- [25] Ekman J., Experimental verification of PEEC based electric field simulations, Electromagnetic Compatibility, EMC. 2001 IEEE International Symposium, 2001, pp. 69
- [26] Verbeek M, Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) models for on-chip passives and interconnects, John Wiley and Sons Ltd. Chichester, UK, 2004, pp. 21
- [27] Clemens M., Weiland T., Numerical algorithms for the FDiTD and FDFD simulation of slowly varying electromagnetic fields, INTERNATIONAL JOURNAL OF NUMERICAL MODELLING: ELECTRONIC NETWORKS, DEVICES AND FIELDS, Int. J. Numer. Model. 12, 3-22 (1999), 1999, pp. 20
- [28] Zhu B., Chen. J., A Hybrid FETD-FDTDMetho d with Nonconforming Meshes, Commun. Comput. Phys. Vol. 9, No. 3, pp. 828-842, 2011, pp. 15
- [29] Fumeaux C., Developments of finite-volume techniques for electromagnetic modeling in unstructured meshes, Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006. 17th International Zurich Symposium, pp. 4
- [30] Clemens M., Weiland T., Discrete electromagnetism with the finite integration technique, Progress In Electromagnetics Research, PIER 32, 65–87, 2001, pp. 23
- [31] Ji X., Lu T., Cai W., Discontinuous Galerkin Time Domain (DGTD) Methods for the Study of 2-D Waveguide-Coupled Microring Resonators, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 23, NO. 11, NOVEMBER, 2005, pp. 11

- [32] Cangellaris A.C., Domain decomposition and multi-scale finite elements for electromagnetic analysis of integrated electronic systems, *Electromagnetic Compatibility*, 2005. EMC 2005. 2005 International Symposium, pp. 6
- [33] Liu J., Liu Q. H., A spectral integral method (SIM) for periodic and nonperiodic structures, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 14, no. 3, 2004, pp. 97
- [34] Gibson W., *Electromagnetic scattering using physical optics*, Tripoint Industries Inc., 2005, pp. 12
- [35] Trappeniers D., Gonz`alez R. G., *Geometric Optics and Electromagnetic Models for Cylindrical Obstacles*, Progress In Electromagnetics Research Symposium 2006, Cambridge, USA, pp. 10
- [36] Su C., Ke H., Hubing T., *Overview of Electromagnetic Modeling Software*, 25th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 2009, pp. 6
- [37] CVEL Electromagnetic modeling, <http://www.cvel.clemson.edu/modeling/EMAG/csoft.html>
- [38] Computer simulation technology, <http://www.cst.com>
- [39] Ansys, <http://www.ansys.com>
- [40] Agilent technologies, <http://www.agilent.com>
- [41] Mentor Graphics, <http://www.mentor.com/>
- [42] Remcom, <http://www.remcom.com/>
- [43] Sonnet Software, <http://www.sonnetsoftware.com/>
- [44] EM Software & Systems FEKO, <http://www.feko.info/>
- [45] Noda T., Sasaki S., Algorithms for Distributed Computation of Electromagnetic Transients towards PC Cluster Based Real-Time Simulations, *International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA*, pp. 5
- [46] Graham S., Snir M., GETTING UP TO SPEED THE FUTURE OF SUPERCOMPUTING, THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2005, pp. 306
- [47] CVEL Electromagnetic Modelling benchmarks, <http://www.cvel.clemson.edu/modeling/software/index.html>
- [48] Nvidia TESLA™ C2050 / C2070 GPU computer processor, Brochure, 2010
- [49] Nvidia, GPU-Accelerated Applications CATALOG JUN 12, Brochure, 2012
- [50] Intel® Technologies Expedite Electromagnetic Simulation, Brochure, 2007
- [51] CST Studio suite High performance computing techniques, Brochure, 2012

За контакти:

Любен Атанасов Илиев, маг. инж., Русенски университет „Ангел Кънчев”, 7017, Русе, ул. „Студентска” 8, катедра: ЕСЕСО, тел. 0896861992, e-mail: lailiev@uni-ruse.bg; luben.iliev@gmail.com

Николай Димитров Пантелеев, доц. д-р секция ВИТ, ИИКТ-БАН, Ръководител на Лаборатория за ЕМС, Български Институт по Метрология, e-mail : emclab@abv.bg

Никола Петров Михайлов, проф. д-р инж., Русенски университет „Ангел Кънчев”, 7017, Русе, ул. „Студентска” 8, катедра: ЕСЕСО, тел. 0888539388, e-mail: mihailov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.