

文章编号:0254-0096(2020)02-0333-06

基于光伏特性和潮流交替迭代的光伏电站 稳态等值建模

吴红斌¹, 何叶¹, 金炜², 潘静², 徐斌³

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力公司, 合肥 230061;
3. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 合肥 230601)

摘要: 传统的光伏稳态等值方法是将光伏电站直接等值为一个节点,并未考虑光伏电站出力特性及内部各项损耗会带来较大计算误差。该文基于光伏电站的拓扑结构并考虑光伏电站的内部损耗情况,将光伏特性和潮流计算方程结合,通过交替迭代不断交换网侧参数,实现对光伏电站的稳态等值建模。利用 IEEE 14 节点算例系统对该文提出的稳态等值模型进行仿真验证,通过与传统等值方法进行对比,证明该文所提出的等值方法更能准确地表征大型并网光伏电站的稳态特性。

关键词: 光伏电站; 潮流分析; 电力系统; 稳态等值; 交替迭代

中图分类号: TM744

文献标志码: A

0 引言

随着光伏电站的大量建设,分析光伏电站对区域电网的稳态影响时,传统的潮流计算方法将其当做 PQ 节点进行处理,并未考虑光伏电站功率传输、网络损耗等稳态性能对电网的影响^[1-2]。因此,开展适用于大型光伏电站的并网分析等值建模方法研究,为光伏电站并网仿真分析提供准确有效的模型基础,具有重要的意义。

目前,国内外在光伏电站等值建模方面主要包括基于逆变器等值建模和光伏系统整体等值建模。文献[3-5]提出基于逆变器等值建模主要是以逆变器为核心,针对光伏电站的暂态特性进行研究,并建立完善的光伏电站逆变器群的整体等值数学模型。文献[6-7]将光伏系统整体等值模型在潮流计算处理成为某个节点,但并未充分考虑光伏电站内部损耗,等值方法精度不高。

本文主要研究基于光伏特性和潮流交替迭代的光伏电站稳态等值建模。基于光伏电站的拓扑结构,考虑了光伏电站的内部损耗情况,将潮流计算和光伏特性方程结合,通过交替迭代不断更新并交换网侧参数,对光伏电站进行稳态等值建模。利用 IEEE 14 节点算例系统,分别在光伏电站采用不同控制策略的情况下,对本

文提出的稳态等值模型进行仿真验证,并与传统等值方法进行了对比分析。

1 光伏电站的拓扑结构

大型光伏电站主要由光伏组件、无功补偿装置、大型并网逆变器、升压变压器、集电线路和其他常见的电气一次、二次设备连接组成,其典型结构如图 1 所示。

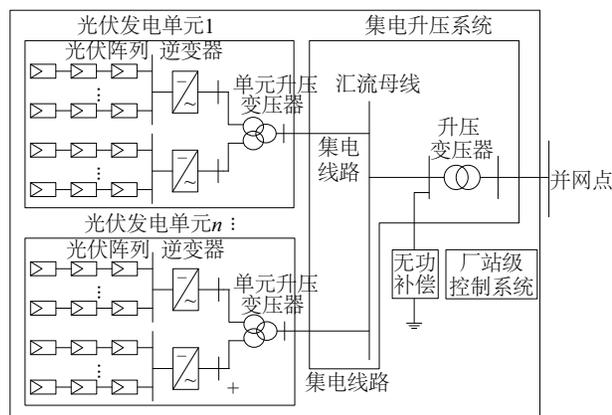


图1 光伏电站典型结构图

Fig. 1 Typical structure diagram of photovoltaic plant

太阳能电池是光伏电站的主要元件,通常同型号的太阳能电池串联形成光伏组件,光伏组件再通过汇流箱和直流配电柜串并联成一个光伏阵列。光伏逆变器是光伏

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900400)

通信作者: 吴红斌(1972—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事分布式发电微电网技术方面的研究。hfwuhongbin@163.com

电站最为核心的元件,主要作用是将光伏阵列输出的直流电能转换成与电网电压、频率一致的交流电^[8]。进行大型光伏电站并网潮流分析时,首先要建立光伏电站功率模型,本文基于光伏电站的拓扑结构,考虑了光伏电站的变压器和集电线路损耗情况,确定光伏电站并网点处的输出功率。

2 计及光伏特性的光伏电站模型

2.1 光伏特性模型

五参数模型为光伏组件的经典数学模型,能精确的表达太阳电池的 $I-U$ 特性:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, I_{ph} —— 光生电流, A; I_0 —— 二极管反向饱和电流, A; q —— 电子电荷, 值为 1.6×10^{-19} C; n —— 二极管理想因子; k —— 玻尔兹曼常数, 值为 1.38×10^{-23} J/K; T —— 绝对温度, °C; R_s —— 太阳电池串联电阻, Ω; R_{sh} —— 太阳电池并联电阻, Ω。

光伏阵列的构成方式包括组件串联、并联、串并联混合 3 种。当串联时,阵列的输出电压成比例增加,并联时输出电流成比例增加。设光伏阵列中组件串联数为 N_s , 并联数为 N_p , 组合的功率效率为 η_{cell} , 阵列电压为 U_{array} , 阵列电流为 I_{array} , 阵列输出功率为 P_{array} , 即光伏阵列模型如下:

$$U_{array} = N_s \times U \quad (2)$$

$$I_{array} = N_p \times I \quad (3)$$

$$P_{array} = U_{array} \times I_{array} = \eta_{cell} \times N_s \times N_p \times U \times I \quad (4)$$

2.2 逆变器模型

光伏阵列并网需通过逆变器方可接入三相电网。逆变器的主要功能就是将光伏阵列输出的直流电转换为与电网电压、频率一致的交流电。适用于潮流计算的逆变器模型一般为功率模型,该模型与逆变器自身结构无关,主要用逆变效率来反映逆变器的输入输出功率关系。当逆变器功率因数为 1 时,逆变器模型如下:

$$U_{ac} = \frac{mU_{array}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$P_{ac} = \eta_{ac} \times P_{array} \quad (6)$$

$$I_{ac} = \frac{P_{ac}}{\sqrt{3}U_{ac}} \quad (7)$$

式中, U_{ac} —— 逆变器输出电压有效值, V; I_{ac} —— 输出电流, A; m —— 调制度; η_{ac} —— 逆变效率。

2.3 光伏电站功率模型

光伏电站主要是由光伏发电单元, 升压变压器和集电线路构成, 本文在潮流计算功率分析中, 考虑到变压器和集电线路会有一定的功率损耗, 故光伏电站接入电网的功率为发电单元逆变器的输出功率总和减去变压器和线路的功率损耗。

光伏电站的集电线路主要由发电单元内部线路和变压器至公共母线线路组成。考虑到发电单元内部线路较短且结构复杂, 集电线路的损耗近似看做变压器至公共母线部分的线路损耗。

每一条集电线路功率损耗计算公式为:

$$\Delta P_L = 3I_{ac}^2 R \quad (8)$$

$$\Delta Q_L = 3I_{ac}^2 X \quad (9)$$

式中, ΔP_L —— 线路有功功率损耗, MW; ΔQ_L —— 线路无功功率损耗, Mvar; R —— 线路电阻, Ω; X —— 线路电抗, Ω; I_{ac} 可由式(7)计算得到。

每台变压器功率损耗公式为:

$$\Delta P_T = P_0 + K_T \beta^2 P_k \quad (10)$$

$$\Delta Q_T = Q_0 + K_T \beta^2 Q_k \quad (11)$$

式中, ΔP_T —— 变压器有功损耗, MW; ΔQ_T —— 变压器无功损耗, Mvar; P_0 —— 变压器空载损耗, MW; P_k —— 变压器短路损耗, MW; Q_0 —— 空载无功损耗, Mvar; Q_k —— 额定负载漏磁功率; K_T —— 负载波动损耗系数, 取值 1.05; β —— 平均负载系数, 取值 0.75。

大型光伏电站接入电网的功率模型, 如式(11)、式(12)所示:

$$P_{ps} = \sum_{i=1}^m P_{dci} - \sum_{i=1}^m \Delta P_{Ti} - \sum_{i=1}^m \Delta P_{Li} \quad (12)$$

$$Q_{ps} = \sum_{i=1}^m Q_{dci} - \sum_{i=1}^m \Delta Q_{Ti} - \sum_{i=1}^m \Delta Q_{Li} \quad (13)$$

式中, m —— 发电单元和变压器数量; P_{ps} —— 光伏电站并网点有功功率; Q_{ps} —— 光伏电站并网点无功功率; P_{dci} —— 第 i 个发电单元有功功率; Q_{dci} —— 第 i 个发电单元无功功率; ΔP_{Ti} —— 第 i 台变压器有功损耗; ΔQ_{Ti} —— 第 i 台变压器无功损耗; ΔP_{Li} —— 第 i 条集电线路有功损耗; ΔQ_{Li} —— 第 i 条集电线路无功损耗。

3 光伏电站稳态等值建模

3.1 传统的潮流计算等值建模

潮流计算是建立光伏电站稳态等值模型的关键环节, 首先需要对发电单元节点类型进行处理。光伏电站在潮流计算中表现出的稳态运行特性主要是由逆变器的并网控制模式决定, 因此潮流计算中光伏电站采用

PQ 或 PV 节点一般根据逆变器的并网控制模式决定。

若将逆变器输出的无功功率作为控制对象,光伏电站采用恒功率因数控制策略并网时,光伏电站可等值为 PQ 节点;若将逆变器的输出电压作为控制对象,光伏电站采用恒电压控制策略并网时,光伏电站可等值为 PV 节点^[8-11]。

3.2 基于光伏特性和潮流交替迭代的等值建模

光伏电站各状态变量不仅受到光照、温度等外界环境不确定性因素的影响,还和电网自身的状态有关;而光伏电站大量功率并网,也会对电网功率和电压的分布产生影响。通过潮流计算和光伏特性方程交替迭代,不断更新网侧参数,将其反馈给光伏发电系统模型,重新联立求解光伏特性方程,将光伏电站稳态等值为一个节点,同时可针对光伏电站和电网的稳态性能进行评估。

如图 2 所示,交替迭代计算的具体流程:

- 1) 获取光伏电站外界环境参数,如阵列表面温度、太阳辐射强度等;
- 2) 假定太阳能电池控制部分能实时实现最大功率追踪策略,设置太阳能电池主要参数的初始值,包括太阳能电池的串、并联电阻及相同温度下不同光照强度所对应的太阳能电池最大功率追踪点电压和电流等;
- 3) 结合光伏 5 参数模型,联立光伏特性方程求解光伏发电单元的出力;
- 4) 根据式(8)~式(11)分别计算光伏电站的总线路损耗和变压器损耗,再由式(12)、式(13)求解光伏电站的出力;
- 5) 若光伏电站并网为恒电压控制方式,将其等效为 PV 节点;若光伏电站并网为恒功率因素控制方式,将其等效为 PQ 节点,进行潮流计算;
- 6) 将潮流计算后更新的网侧参数再次反馈至太阳能电池模型,重新联立求解光伏特性方程,进行参数修正;
- 7) 设置光伏电站参数运行条件,判断是否存在参数

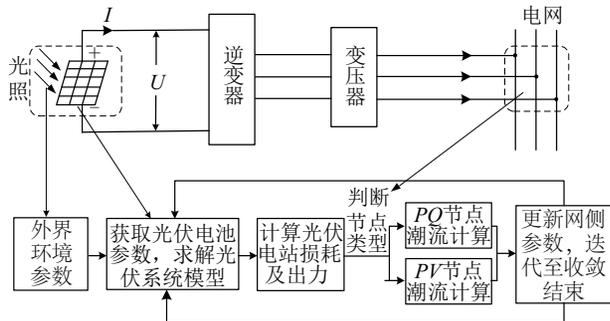


图2 光伏电站模型与潮流计算交替迭代图

Fig. 2 Alternating iteration diagram of photovoltaic plant model and power flow calculation

越限,如果越限,返回步骤 2)重新计算;如果不越限,得到光伏电站稳态等值结果。

4 算例分析

4.1 算例介绍

光伏电站通过升压变压器和 35 kV 线路接入 IEEE14 节点标准测试系统的 7 号节点,具体情况如图 3 所示。系统数据参看文献[12],潮流计算采用标么值,基准容量 100 MVA,基准电压取额定电压,应用 Matlab 程序实现系统仿真计算。

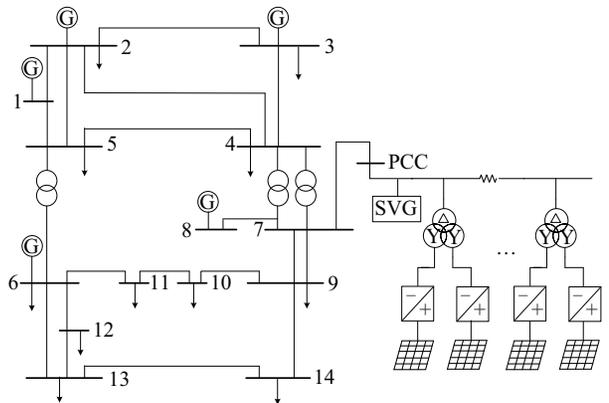


图3 光伏电站接入 IEEE 14 系统图

Fig. 3 System diagram of photovoltaic power station access to IEEE 14

本算例采用太阳能电池五参数模型,整个光伏电站的额定容量为 15 MW,共由 100 个参数相同的光伏发电单元组成,其中每个发电单元由电池模块串并联组成,其中串联数为 5,并联数为 66。表 1 为不同光照强度下的太阳能电池最大功率点信息已知在同一温度条件下,光

表1 太阳能电池参数变化表

Table 1 Parameter change of photovoltaic cell

辐照度/ kW·m ⁻²	电池 电压/V	电池 电流/A	输出 功率/W
0.2	251.8	70.50	0.0177
0.3	256.6	107.6	0.0276
0.4	260.5	144.8	0.0377
0.5	263.7	182.0	0.0480
0.6	266.3	219.2	0.0584
0.7	268.7	256.4	0.0689
0.8	270.4	293.7	0.0794
0.9	271.9	333.0	0.0954
1.0	273.5	368.3	0.1007

光伏电站的容量会随太阳辐射条件的变化而变化。当外界温度为 25 ℃时,设置光伏电站现场的太阳辐射强度在 0.2~1.0 kW/m² 逐步递增。

4.2 不同控制策略下的对比分析

设定光伏电站现场的太阳辐照度在 0.2~1.0 kW/m² 之间,并以 0.1 kW/m² 为单位均匀递增,接入节点 7 光伏电站出力容量如图 4 所示。

当光伏电站采用恒功率因数控制策略并网时,并网节点电压随太阳辐照度的升高而升高,其结果见表 2。当辐照度达到 1.0 kW/m² 时,节点 7 的电压达到了上限值 1.07397 pu,比较辐照度变化过程中节点最大电压与辐照度最小的情况,节点 7 电压 U_7 最大升高 0.066%。由此可知,太阳辐照度的大幅变化导致了光伏电站有功出力

大幅变化,从而也在一定程度上影响了电网电压分布。

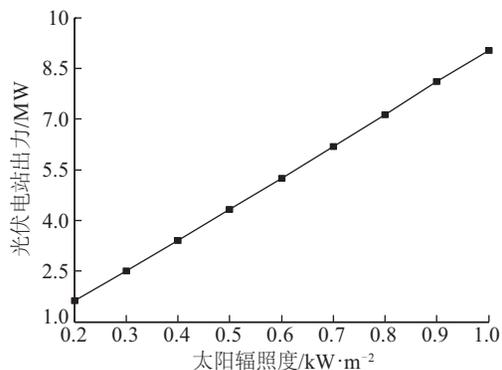


图4 太阳辐照度变化时光伏电站出力情况
Fig. 4 Output of photovoltaic plant under solar irradiance changing

表2 恒功率因数控制下的并网点计算结果

Table 2 Calculation results of grid connection point under constant power control

节点有功/MW	节点电压幅值/pu	节点角度/(°)	系统总损耗 P/MW	系统总损耗 Q/Mvar
1.623	1.0733	-7.6241	10.224	37.627
2.497	1.0734	-7.5278	10.175	37.386
3.395	1.0734	-7.4289	10.126	37.142
4.310	1.0735	-7.3282	10.076	36.897
5.236	1.0732	-7.2262	10.025	36.652
6.177	1.0737	-7.1227	9.9750	36.407
7.120	1.0738	-7.0189	9.9250	36.164
8.120	1.0739	-6.9089	9.8720	35.911
9.037	1.0740	-6.8080	9.8240	35.683

当光伏电站采用恒电压控制策略并网时,光伏电站吸收的无功功率随光伏电站有功出力的增加而增加,其结果见表 3。当辐照度达到 1.0 kW/m² 时,节点 7 吸收

的无功功率达到了最大量 15.210 Mvar。随着光伏电站的有功功率的增加,线路电容发出的无功功率增加,导致光伏电站吸收的无功功率也随之增加。

表3 恒电压控制下的并网点计算结果

Table 3 Calculation results of grid connection point under constant voltage control

节点有功/MW	节点无功/Mvar	节点角度/(°)	系统总损耗 P/MW	系统总损耗 Q/Mvar
1.623	-14.613	-7.680	10.266	39.009
2.497	-14.686	-7.582	10.218	38.768
3.395	-14.761	-7.482	10.168	38.524
4.310	-14.836	-7.379	10.118	38.279
5.236	-14.912	-7.258	10.068	38.035
6.177	-14.987	-7.170	10.018	37.790
7.120	-15.062	-7.065	9.9680	37.547
8.120	-15.140	-6.953	9.9150	37.295
9.037	-15.210	-6.850	9.8680	37.066

4.3 不同等值方法的对比分析

当光伏电站采用恒功率因数控制策略并网,太阳辐照度在 $0.2\sim 1.0\text{ kW/m}^2$ 范围内均匀变化时,将传统潮流计算方法和本文提出的方法中的电网功率损耗进行对比,其对比结果见图 5。

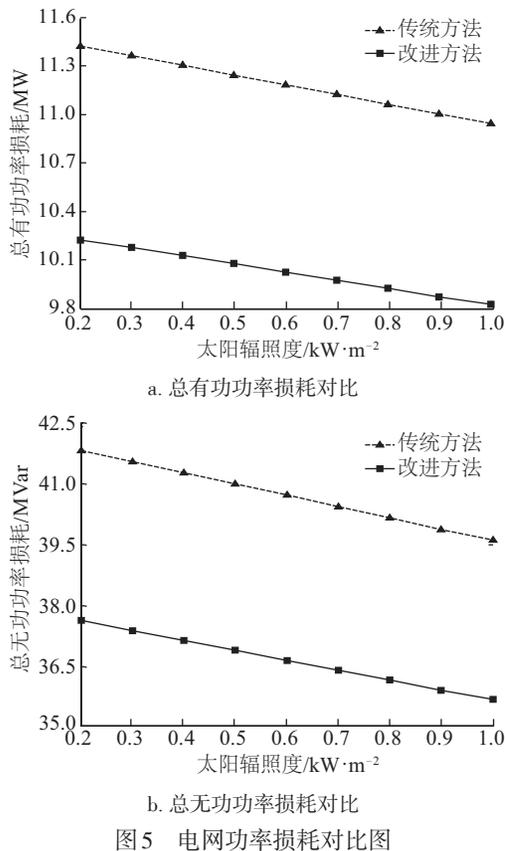


图5 电网功率损耗对比图

由图 5 可见,辐照度对电网损耗有直接影响,电网损耗会随辐照度升高而下降。图 5a 中,当辐照度达到最高值 1.0 kW/m^2 时,传统潮流计算方法中的总有功损耗为 10.944 MW ,比原系统有功损耗降低了 4.17% ;而本文提出的方法中总有功损耗仅为 9.824 MW ,比原系统有功损耗降低 3.91% 。图 5b 中,传统潮流计算方法中的总无功损耗为 39.616 Mvar ,比原系统无功损耗降低 5.25% ;而本文提出的方法中总无功损耗仅为 35.683 Mvar ,比原系统无功损耗降低 5.16% 。通过 2 种方法的对比,本文提出的方法输电损耗较小,更有利于进行电网调度,一定程度上提高了光伏电站稳态等值模型的精度。

5 结论

基于光伏发电系统的特性方程,考虑光伏电站内部

各项损耗,建立了光伏电站的功率模型。本文提出基于光伏特性和潮流交替迭代的光伏电站稳态等值建模方法,并在 IEEE 14 节点系统上进行验证。计算结果表明,与传统的潮流计算等值法相比,本文提出的方法克服了结果不够精确等缺点,能够准确地反映出大型并网光伏电站的稳态等值建模对电网性能的影响,为光伏电站并网分析提出了一种较好的稳态等值建模方法。

[参考文献]

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14. DING M, WANG W S, WANG X L, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] 刘东冉,陈树勇,马敏,等.光伏发电系统模型综述[J].电网技术,2011,35(8):47-52. LIU D R, CHEN S Y, MA M, et al. Review on models for photovoltaic generation system [J]. Power system technology, 2011, 35(8): 47-52.
- [3] 李春来,王晶,杨立滨.典型并网光伏电站的等值建模研究及应用[J].电力建设,2015,36(8):114-121. LI C L, WANG J, YANG L B. Equivalent modeling research and application of typical grid connected photovoltaic power station [J]. Electric power construction, 2015, 36(8): 114-121.
- [4] 闫凯,张保会,瞿继平,等.光伏发电系统暂态建模与等值[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):1-8. YAN K, ZHANG B H, QU J P, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents [J]. Power system protection and control, 2015, 43(1): 1-8.
- [5] 崔晓丹,李威,李兆伟,等.适用于机电暂态仿真的大型光伏电站在线动态等值方法[J].电力系统自动化,2015,39(12):21-26. CUI X D, LI W, LI Z W, et al. An online dynamic equivalent method for large-scale photovoltaic power plant suitable for electromechanical transient stability simulation [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(12): 21-26.
- [6] TAN Y T, KIRSCHEN D S. Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, U.S., 2007.
- [7] 王一波,伍春生,廖华,等.大型并网光伏发电系统稳态模型与潮流分析[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(8):1093-1097. WANG Y B, WU C S, LIAO H, et al. Steady-state

- power flow analyses of large-scale grid-connected photovoltaic generation system[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2009, 49(8): 1093-1097.
- [8] 葛虎. 大型光伏电站仿真建模[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- GE H. Simulation model of large-scale photovoltaic power plant[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [9] 王皓怀, 汤涌, 侯俊贤, 等. 潮流计算和机电暂态仿真中风光储联合发电系统的实用等值方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 1-8.
- WANG H H, TANG Y, HOU J X, et al. Equivalent method of integrated power generation system of wind, photovoltaic and energy storage in power flow calculation and transient simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 1-8.
- [10] 彭彬, 刘宁, 吴迪. 配电网潮流计算中的分布式电源建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 152-156.
- PENG B, LIU N, WU D. Modeling of distributed generation for distribution system power flow calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(2): 152-156.
- [11] 王振树, 林梅军, 刘岩, 等. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.
- WANG Z S, LIN M J, LIU Y, et al. Power flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [12] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 309-310.
- ZHANG B M, CHEN S S, YAN Z. Advanced power system analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 309-310.
- [13] 丁明, 郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 35-40.
- DING M, GUO X F. Three-phase power flow for the weakly meshed distribution network with the distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 35-40.

STEADY STATE EQUIVALENT MODELING OF PHOTOVOLTAIC PLANT BASED ON ALTERNATING ITERATION OF PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS AND POWER FLOW

Wu Hongbin¹, He Ye¹, Jin Wei², Pan Jing², Xu Bin³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China;

3. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: As the traditional steady-state equivalence method of grid-connected photovoltaic plant is to directly regard as one node without considering the output characteristics and losses of the photovoltaic plant, it will result in larger calculation error. A new calculation process of a photovoltaic plant is proposed which combines the photovoltaic characteristic equations and power flow calculation together in this paper. During this calculation process, it take into account the internal loss of photovoltaic plant. Exchanging the grid side parameters through alternating iteration, it realizes the steady-state equivalent model of photovoltaic plant. With the IEEE 14 example system, the proposed steady-state equivalent model is verified. Through comparing with the traditional equivalent method, the proposed method can characterize the steady-state characteristics of large-scale grid-connected photovoltaic plant more accurately.

Keywords: photovoltaic generators; load flow analysis; electric power systems; steady-state equivalence; alternating iteration