

计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模

吴 峰,戴小妹

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:计及光伏等新能源电源的配电网广义负荷模型,通常是在传统综合负荷模型的基础上并联新能源电源的等值模型,其结构庞大,模型阶数较高,使得参数难以辨识。提出一种计及光伏的配电网广义负荷一体化等值建模方法,其简化了模型结构,且无需依赖光伏发电系统的出力数据。基于光伏发电系统动态特性的理论和仿真分析,提出光伏发电系统的多项式等值模型;建立光伏发电系统和配电网静态负荷的一体化模型,扩展参数取值范围,并采用改进遗传算法对模型参数进行辨识。基于DIgSILENT-MATLAB联合仿真平台的仿真结果表明,所提一体化等值模型能够较为准确地描述计及光伏发电系统的配电网广义负荷的动态特性。

关键词:光伏发电系统;配电网;一体化建模;多项式模型;动态特性;负荷建模;联合仿真

中图分类号:TM 714;TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003007

0 引言

分布式光伏在配电网中的渗透率不断增加,部分地区光伏电源的出力已经超越了负荷需求,配电网潮流双向流动常态化,其负荷特性发生变化,传统的配电网负荷模型已经难以适用^[1-3]。建立分布式光伏发电系统高渗透背景下精确、实用的配电网负荷等值模型,对电力系统的稳定性及可靠性仿真计算分析有着重要的意义^[4-7]。

在光伏发电系统的等值建模方面,相关学者已经开展了大量的研究工作。文献[8]利用灰箱模型的概念建立光伏发电系统的静态等效模型;文献[9]将三相单级式光伏发电系统等值为一个受控的有功功率源,但存在模型参数较多的问题,且部分参数的分散性较大;文献[10]建立基于恒功率因数控制的光伏发电系统的三参数等效模型,模型中将光伏发电系统等值为一个增加了比例环节的二阶欠阻尼系统。由此可知,光伏发电系统由于内部不包含旋转设备,其并网特性能够由静态模型等效描述。

模型结构是建立广义负荷模型的前提^[1],现有研究一般采用新能源电源模型并联传统的配电网综合负荷模型(CLM)的模型结构^[11-13]。文献[8-10]将光伏发电系统的等值模型连接在综合负荷模型的虚拟母线上,等值含光伏的配电网广义负荷特性;文献[1,14-15]建立含有风机的配电网广义负荷模型,即以风机等值模型并联综合负荷模型。以上配电网广义负荷模型结构均是在传统综合负荷模型的基础上增加新能源电源的模型。但在建立广义负荷模型时,每在模型上并联一个新的模型,既会增加模型的

复杂程度,又会使模型的参数增多,参数辨识难度相应增大,难以适应大规模的电力系统仿真,增大了模型实用化的难度。

为了建立光伏高渗透率背景下,适用于大规模电力系统暂态仿真研究的实用配电网广义负荷模型,基于含光伏的配电网广义负荷等值模型结构阶数高的现状,本文在现有研究的基础上,提出对光伏发电系统和配电网静态负荷进行一体化建模,即通过扩展传统综合负荷模型静态部分参数取值范围,实现对计及光伏的配电网广义负荷特性的等效描述。首先通过理论分析和仿真计算,分析光伏发电系统的动态特性,提出光伏发电系统的多项式等值模型;然后,建立光伏发电系统和配电网静态负荷的多项式一体化等值模型,确定配电网广义负荷模型结构以及模型参数取值范围,并基于改进遗传算法实现参数辨识;最后,通过算例仿真,验证了本文所提模型的有效性,且模型结构简单,只需配电网的功率输出数据即可实现模型辨识,更具有实用性。

1 光伏发电系统等值模型

光伏发电系统大规模接入配电网运行,配电网的动态特性由光伏发电系统和负荷共同主导,当光伏渗透率(本文定义为光伏电源的发电功率与配电网有功负荷的比值)高到一定程度,以传统的综合负荷模型等值计及光伏的配电网动态特性存在较大偏差^[16]。在此背景下,光伏发电系统的动态特性不可忽略,建立适用于大规模电力系统暂态仿真研究的实用配电网广义负荷模型具有重要意义。

现有光伏发电系统的等值建模研究均是基于容量较小的光伏发电系统,其控制系统中通常不具备无功补偿环节^[9-10]。而大中规模的光伏发电系统通常具有无功补偿能力以实现低压穿越,本文基于这

收稿日期:2019-07-23;修回日期:2020-01-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51837004)

Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51837004)

种光伏发电系统开展等值建模研究。

1.1 光伏发电系统动态特性

光伏发电系统的动态特性主要由光伏逆变器及其控制系统决定^[17]。光伏逆变器在光伏并网系统中承担着换流及隔离谐波电流和直流漏电流的作用。本文光伏发电系统采用有功功率和无功功率解耦的控制模式,其主要通过电压外环控制实现控制目标^[16,18]。

基于DIgSILENT仿真平台搭建包含光伏发电系统及综合负荷的仿真系统,具体结构示意图见附录中图A1。在母线C₂处设置三相短路故障,故障期间母线C₂处电压最低降落到0.8 p.u.左右,故障持续0.1 s。对系统进行暂态仿真计算,母线C₂的电压(标么值)变化曲线如图1(a)所示,光伏发电系统、静态负荷以及动态负荷在该电压扰动下的有功功率暂态响应如图1(b)所示。

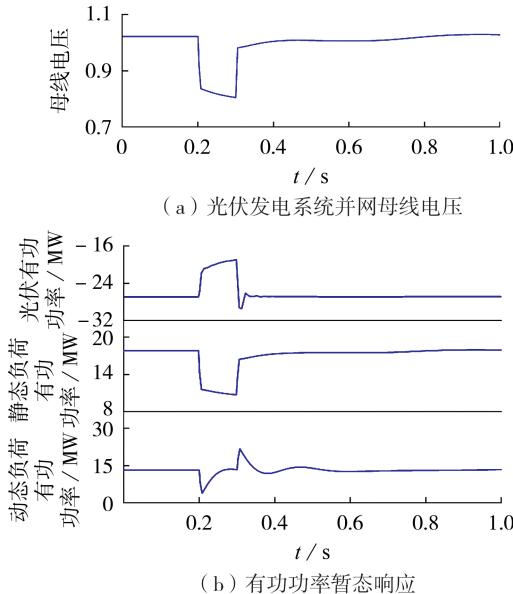


图1 母线电压变化及功率响应曲线

Fig.1 Curves of bus voltage variation and power response

由于光伏发电功率波动即光照和温度变化主要集中在5 min的时间尺度上^[19],而本文研究的是广义负荷的机电暂态特性,因此仿真过程中光照强度和温度保持不变。机电暂态仿真计算过程中,在控制系统参数确定的情况下,光伏发电系统的功率响应主要取决于其并网点电压。本文中功率流动均以从大电网吸收功率为正向。

由图1可以看出,在相同的电压扰动下,多项式静态负荷有功功率随电压变化的特性与光伏发电系统一致。因此,光伏发电系统的有功特性可以用负的多项式静态负荷模型等效描述。

基于上述仿真结果,以多项式静态负荷模型(有功基准值为负)等值光伏发电系统进行暂态仿真计

算。光伏发电系统与多项式静态负荷模型的有功及无功功率暂态响应特性对比图如图2所示。

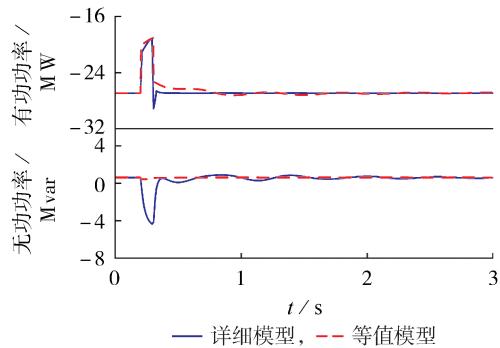


图2 光伏发电系统与多项式静态负荷模型的功率暂态响应对比

Fig.2 Power transient response comparison between photovoltaic power generation system and polynomial static load model

由图2可以看出,多项式静态负荷模型的有功暂态响应可以较好地拟合光伏发电系统的有功暂态特性,而无功暂态响应与光伏发电系统的无功功率暂态特性之间存在较大的偏差。

1.2 光伏发电系统等值模型

根据上文分析,本文在多项式静态负荷模型的基础上进行变换,提出光伏发电系统的等值模型。

光伏发电系统在正常运行情况下的无功输出很小甚至为0,为了避免在无功输出为0的情况下,光伏发电系统的无功特性无法表示,采用多项式负荷模型的有名值形式表示其等值模型,如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{pv} = a_{pz} U^2 + b_{pi} U + c_{pp} \\ Q_{pv} = a_{qz} U^2 + b_{qi} U + c_{qp} \end{cases} \quad (1)$$

其中,P_{pv}和Q_{pv}分别为光伏发电系统的有功和无功功率,单位分别为MW和Mvar;U为光伏并网母线的实际电压,单位为MV;a_{pz}、b_{pi}、c_{pp}和a_{qz}、b_{qi}、c_{qp}分别为有功和无功多项式模型二次项、一次项、常数项的系数。

由图2可以看出,在故障期间,光伏发电系统的有功功率变化与电压变化正相关,而无功功率变化与电压变化负相关。因此,对式(1)无功部分进行变换,以电压变化量作为无功模型的自变量,采用如式(2)所示的多项式模型等值光伏发电系统。

$$\begin{cases} P_{pv} = a_{ppv} U^2 + b_{ppv} U + c_{ppv} \\ Q_{pv} = a_{qz} U^2 + b_{qi} U + c_{qp} = \\ a_{qpv} (U_0 - U)^2 + b_{qpv} (U_0 - U) + c_{qpv} \end{cases} \quad (2)$$

其中,a_{ppv}、b_{ppv}、c_{ppv}和a_{qpv}、b_{qpv}、c_{qpv}分别为光伏等值模型有功和无功部分二次项、一次项、常数项的系数;本文中下标“0”均表示各变量的初始运行状态。

相较于多项式静态负荷模型,式(2)所示的多项式模型的无功输出会随着电压扰动的增加而增大,能够体现光伏发电系统的无功补偿作用。该模型描

述了光伏等值功率随电压的变化特性,且与多项式负载模型类似,等值功率均以电压的二阶多项式形式表达,二者功率随电压变化的特性具有类似的特征,体现了光伏发电系统类似负载的特性;同时其模型结构与多项式静态负载模型类似,便于对光伏发电系统和静态负载进行一体化建模,以简化配电网广义负载模型结构。

1.3 光伏发电系统等值模型有效性分析

基于前述仿真系统与故障设置,以所提多项式模型等值光伏发电系统进行暂态仿真,观察光伏发电系统等值前后的功率暂态响应。光伏发电系统的装机容量为28.5 MW,实际出力分别为27、23、14 MW。模型参数辨识结果如表1所示,其中 E_r 为曲线拟合的残差。

在相同的装机容量下,光伏发电系统的出力越小,其有功输出受限幅环节影响越小,相应的有功功率波动就越小,有功参数绝对值也随之减小;对于无功部分,从光伏等值模型可知, $c_{qpv} = Q_{pv0}$,而在相同的电压扰动下,光伏发电系统提供的无功支撑是相同的,无功功率波动程度不变,相应的无功参数也保持不变。

光伏发电系统实际出力为27 MW情景下的功率暂态响应对比如图3所示。

由表1和图3可以看出,在相同的电压扰动下,对于光伏发电系统的不同发电状态(实际出力与装机容量之比),等值模型均能较好地描述光伏发电系统的功率暂态响应特性。

结合图1(a)及图3可以看出:在故障前[0,0.2] s以及故障切除后(0.3,3] s的时间范围内,电压处于恒定或者小扰动运行状态,光伏发电系统的功率输出基本恒定,处于恒功率运行状态;在[0.2,0.3] s电压扰动期间,无功补偿控制^[20]及限流控制无功优先模块作用,光伏发电系统的无功功率(无功电流)输出随着电压扰动的增大而增大,同时,有功功率(有功电流)输出相应减小,处于电流限幅运行阶段。由此可见,本文所提的多项式等值模型能够等效描述光伏发电系统的动态特性,基本能够体现光伏发电系统在实际运行中的恒功率、无功补偿及电流限幅运行状态,是一种用于光伏发电系统的暂态仿真研究以及配电网的广义负载建模的简单有效的仿真模型。

需要说明的是,本文所提的等值模型适用于输

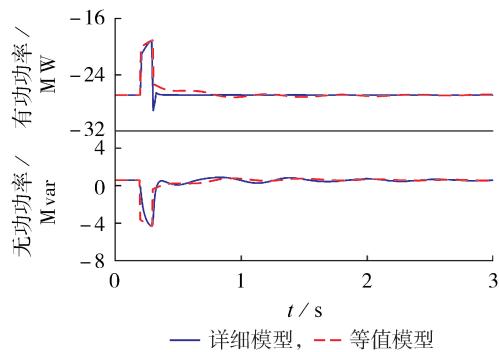


图3 光伏发电系统详细模型与等值模型的
功率暂态响应对比

Fig.3 Power transient response comparison between detailed model and equivalent model of photovoltaic power generation system

电侧故障时的电力系统暂态稳定分析,故障主要发生在配电网外部,且暂态中电网电压的跌落一般在10%~60%范围内^[10],因此,对于光伏近端口故障时,光伏发电系统的无功电流输出恒定为电流最大限值、有功电流输出降为0的场景,本文所提模型没有考虑。

2 光伏发电系统和静态负载一体化建模

光伏发电系统多项式等值模型与多项式静态负载模型结构相似,为了降低配电网广义负载模型阶数,简化模型结构,本文对光伏发电系统和配电网静态负载进行一体化建模。

2.1 光伏发电系统和静态负载一体化模型

配电网多项式静态负载模型为:

$$\begin{cases} \frac{P_s}{P_{s0}} = a_{ps} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_{ps} \frac{U}{U_0} + c_{ps} \\ \frac{Q_s}{Q_{s0}} = a_{qs} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_{qs} \frac{U}{U_0} + c_{qs} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_s 和 Q_s 分别为配电网综合负载模型静态部分的有功和无功功率; a_{ps} 、 b_{ps} 、 c_{ps} 和 a_{qs} 、 b_{qs} 、 c_{qs} 分别为配电网有功和无功多项式负载模型二次项、一次项、常数项的系数。

由式(2)、(3)可知,光伏发电系统等值模型和静态负载模型结构相似。将式(2)和式(3)通过功率一体化可得光伏负载一体化等值模型:

表1 多项式模型参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results of polynomial model

光伏出力 / MW	a_{ppv}	b_{ppv}	c_{ppv}	a_{qpv}	b_{qpv}	c_{qpv}	$E_r / \%$
27	-310.454	-28.5705	-3.08	100.5214	-104.5578	0.588	3.59
23	-150.463	-18.6616	-10.38	100.5214	-104.5578	0.430	3.17
14	-10.375	-1.5617	-13.04	100.5214	-104.5578	0.165	2.77

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{P_{10}} &= \frac{P_{pv} + P_s}{P_{pv0} + P_{s0}} = \frac{a_{ppv}U_0^2 + a_{ps}P_{s0}}{P_{10}} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + \\ &\quad \frac{b_{ppv}U_0 + b_{ps}P_{s0}}{P_{10}} \frac{U}{U_0} + \frac{c_{ppv} + c_{ps}P_{s0}}{P_{10}} = \\ &\quad a_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \frac{U}{U_0} + c_p \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_{10}} &= \frac{Q_{pv} + Q_s}{Q_{pv0} + Q_{s0}} = \frac{a_{qpv}U_0^2 + a_{qs}Q_{s0}}{Q_{10}} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + \\ &\quad \frac{b_{qs}Q_{s0} - (2a_{qpv}U_0 + b_{qpv})U_0}{Q_{10}} \frac{U}{U_0} + \\ &\quad \frac{a_{qpv}U_0^2 + b_{qpv}U_0 + c_{qpv} + c_{qs}Q_{s0}}{Q_{10}} = \\ &\quad a_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_q \frac{U}{U_0} + c_q \end{aligned} \quad (5)$$

其中, P_1 和 Q_1 分别为一体化模型的有功功率和无功功率; a_p 、 b_p 、 c_p 和 a_q 、 b_q 、 c_q 分别为一体化模型有功和无功部分的二次项、一次项、常数项系数。

式(4)、(5)中一体化等值模型的参数 a_p 、 b_p 、 c_p 、 a_q 、 b_q 、 c_q 可由光伏发电系统等值模型的参数及多项式静态负荷模型的参数推导得出, 具体的计算表达式为:

$$\begin{cases} a_p = \frac{a_{ppv}U_0^2 + a_{ps}P_{s0}}{P_{pv0} + P_{s0}} \\ b_p = \frac{b_{ppv}U_0 + b_{ps}P_{s0}}{P_{pv0} + P_{s0}} \\ c_p = 1 - a_p - b_p \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_q = \frac{a_{qpv}U_0^2 + a_{qs}Q_{s0}}{Q_{pv0} + Q_{s0}} \\ b_q = \frac{b_{qs}Q_{s0} - (2a_{qpv}U_0 + b_{qpv})U_0}{Q_{pv0} + Q_{s0}} \\ c_q = 1 - a_q - b_q \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, 一体化模型参数 a_p 、 b_p 、 a_q 、 b_q 分别与静态负荷模型的参数 a_{ps} 、 b_{ps} 、 a_{qs} 、 b_{qs} 对应相关, 且其相关性随着光伏渗透率的提高而减小。同时, 一体化模型参数的取值也取决于光伏发电系统参数。可见一体化模型是配电网静态负荷特性、光伏发电系统特性及光伏渗透率的综合体现。对于常数项参数, 由于其值可由一次项及二次项参数计算获得, 此处不再讨论。

对比一体化模型及静态负荷模型参数可知: 静态负荷模型参数 a_{ps} 、 b_{ps} 、 c_{ps} 、 a_{qs} 、 b_{qs} 、 c_{qs} 表示静态负荷中恒阻抗、恒电流及恒功率负荷所占比例, 其取值范围通常为 0~1; 而一体化模型参数 a_p 、 b_p 、 c_p 、 a_q 、 b_q 、 c_q 表示一体化模型有功功率及无功功率与电压平方及电压之间的比例关系, 描述的是光伏发电系统与静态负荷的一体化综合特性, 其取值范围也相对扩大。

综上可见: 一方面, 光伏发电系统和配电网静态负荷的一体化建模体现了光伏发电系统类似负荷的特性, 一体化建模相当于在光伏发电系统和负荷之间建立功率和特性接口, 从而以多项式模型对二者的综合特性进行描述; 另一方面, 一体化建模基于参数变换, 通过扩展参数的取值范围建立光伏发电系统和静态负荷的统一结构, 在准确描述配电网广义负荷等值特性的基础上能够减少模型的元件个数, 降低模型阶数, 简化模型结构。

2.2 一体化模型的有效性分析

为了验证本文一体化等值建模方法的可行性, 基于附录中图 A1 所示的仿真系统, 设置综合负荷的有功功率为 30 MW, 无功功率为 10 Mvar, 其中, 静态负荷参数见附录中表 A1; 光伏发电系统装机容量为 28.5 MW, 实际出力为 27 MW, 其等值多项式模型的参数可由前文获取。

以所提的一体化等值建模方法建立光伏发电系统和静态负荷的一体化模型, 模型参数由式(6)、(7)计算得出, 如表 2 所示。设置母线 C_2 在 0.2 s 时发生三相短路故障, 电压跌落到 0.8 p.u., 故障在 0.1 s 后切除, 在一体化等值建模前后分别进行暂态仿真计算, 观察等值前后并网点的功率暂态响应, 其对比图如附录中图 A2 所示。

表 2 一体化多项式模型参数

Table 2 Parameters of integrated polynomial model

参数	取值	参数	取值
P_{10} / MW	-9.3504	a_q	5.5798
Q_{10} / Mvar	1.0327	b_q	12.9884
a_p	-0.087	c_q	-17.5682
b_p	0.6831	E_r / %	11.17
c_p	0.4039		

从表 2 和附录中图 A2 可知, 一体化等值模型的功率暂态响应曲线与原模型的功率暂态响应曲线的拟合效果较好, 一体化等值模型基本能够描述原模型的暂态功率特性, 因此本文所提的一体化等值建模方法是有效的。

上述仿真仅基于光伏发电系统和负荷的单一公共连接点, 一体化模型的参数由计算获得。对于含较多分散光伏节点的配电网, 其等值模型的参数通过参数辨识获取。同时, 参考表 2 中参数值, 本文多项式一体化模型参数的初始搜索范围建议为 -5~15。

3 计及光伏的配电网负荷一体化等值模型

3.1 配电网广义负荷一体化等值模型结构

计及光伏发电系统的配电网负荷一体化等值模型结构如附录中图 A3 所示, 其静态部分为光伏发电系统和静态负荷多项式一体化模型, 动态部分为感应电动机三阶机电暂态模型。

模型中的功率平衡表达式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{eq}} = P_{L,\text{eq}} + P_D \\ Q_{\text{eq}} = Q_{L,\text{eq}} + Q_D \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{L,\text{eq}} = P_L + P_m \\ Q_{L,\text{eq}} = Q_L + Q_m \end{cases} \quad (9)$$

其中, P_{eq} 和 Q_{eq} 分别为等值模型的等效有功和无功功率; P_D 和 Q_D 分别为配电网等值阻抗 R_D+jX_D 吸收的有功和无功功率; $P_{L,\text{eq}}$ 和 $Q_{L,\text{eq}}$ 分别为广义负荷吸收的有功和无功功率; P_m 和 Q_m 分别为感应电动机负荷吸收的有功和无功功率。若功率取值为负, 则表示向电网输送功率。

3.2 配电网广义负荷模型参数及辨识

本文配电网广义负荷模型中对动态特性影响较大的独立参数包括^[21]: 多项式一体化模型参数 a_p 、 b_p 、 a_q 、 b_q ; 感应电动机定子电抗 X_s 及初始滑差 s_0 ; 配电网等值电抗 X_D 。

对于综合负荷而言, 感应电动机比例 P_{MP} 对系统暂态稳定分析的影响也不可忽视。本文通过辨识感应电动机负荷有功功率初值 P_{m0} 实现对动态负荷比例 P_{MP} 的辨识。

本文参数辨识基于 DIGSILENT-MATLAB 联合仿真平台实现。基于 DIGSILENT 仿真平台搭建仿真系统, 进行机电暂态仿真; 基于 MATLAB 平台应用改进遗传算法实现参数优化; 利用二者之间的循环数据交换进行参数辨识, 直至达到收敛条件。

等值模型的输入为并网母线的电压, 输出为配电网与输电网之间流通的有功和无功功率。本文采用均方根误差来描述配电网与等值模型功率暂态响应曲线之间的误差, 即:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \hat{P}_i)^2}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N}} \quad (10)$$

其中, E 为误差指标; N 为采样点个数; P_i 和 Q_i 分别为配电网在第 i 个时间点的有功和无功功率值; \hat{P}_i 和 \hat{Q}_i 分别为等值模型在第 i 个时间点的有功和无功功率值。

在本文参数辨识过程中, 等值模型静态一体化部分的功率基准值可在已知配电网功率以及感应电动机比例的情况下直接获取, 无需获取光伏发电系统的出力数据, 这为模型的实用化提供了方便。此外, 本文根据文献[22]的参数辨识范围调整方法对参数初始搜索范围进行相应调整。

4 仿真算例

4.1 仿真系统

基于电力系统仿真平台 DIGSILENT 搭建如附录中图 A4 所示的输配电网仿真系统, 输电系统为 3 机 9 节点系统, 配电系统通过母线 C_2 接入输电系统的节点 8。配电系统由 110 kV 级配电网和 35 kV 级配电网通过三绕组变压器 T_1 连接到配电母线 C_1 。配电

系统负荷采用综合负荷模型, 静态部分为恒定阻抗负荷, 动态部分为感应电动机负荷。配电系统中各线路、各节点负荷、升压变压器 T_1 以及光伏发电系统的具体参数取值详见文献[16], 各节点光伏发电系统的参数均保持一致。

本文算例系统中配电系统的电压等级较高, 其供电容量在几十兆瓦级, 各节点所接负荷为该节点所有供电负荷的等效负荷, 因此每个节点都包含动态负荷和静态负荷。同样地, 各节点所接光伏发电系统为该节点供电区域内分布式光伏发电系统的等效, 因此在分布式光伏高渗透率背景下, 大部分节点均包含光伏电源。

为了获取不同运行工况下, 计及光伏的配电系统功率响应数据, 在配电母线 C_2 上设置三相短路故障进行暂态仿真计算, 故障于 0.2 s 时发生, 持续 0.1 s, 母线电压分别发生 20%、30%、40% 额定值的降落, 故障切除后母线 C_2 电压恢复正常运行值。本文配电系统从母线 C_1 处进行等值, 观察在相同的电压激励下, 等值模型和配电系统的输出功率变化情况。

4.2 仿真结果分析

为了验证本文配电网广义负荷一体化等值模型在光伏高渗透率下的有效性及光伏低渗透率时的适用性, 分别设置 120%、70%、10% 这 3 种不同的光伏渗透率。在光伏渗透率为 120% 下, 光伏发出的有功功率可以满足配电系统的全部有功负荷需求, 配电系统向输电网倒送功率; 在光伏渗透率为 70% 下, 光伏可以满足大部分配电系统负荷的有功需求, 配电系统仍需从输电系统吸收功率; 在光伏渗透率为 10% 下, 光伏发电较少, 可以满足配电系统部分地区的负荷需求, 配电系统大部分有功功率来源于输电系统。

为了体现在模型结构相似及辨识参数数量相同的情况下, 本文模型(记为等值模型 1)相较于传统综合负荷模型(记为等值模型 2)具有更好的描述能力, 基于这 2 种模型进行动态等值。

分别基于 3 种不同的光伏渗透率进行暂态仿真计算, 以配电系统有功及无功功率暂态响应数据对等值模型进行参数辨识, 并对比配电系统及其等值模型的功率响应情况。3 种光伏渗透率下等值模型参数辨识结果见表 3, 其中 E_1 、 E_2 分别为等值模型 1 和等值模型 2 的曲线拟合残差; 感应电动机定子电抗 X_s 及配电网等值电抗 X_D 均为标幺值, 前者以电动机自身容量作为容量基值, 后者以配电网基准容量作为容量基值。配电系统及其等值模型在电压扰动为 30%、光伏渗透率为 120% 时的有功功率及无功功率暂态响应对比图如图 4 所示。

由表 3 及图 4 可以看出, 在不同工况光伏高渗透率的情况下, 相较于传统的综合负荷模型, 本文所提模型的功率暂态响应曲线可以更好地拟合配电系统

表3 等值模型参数辨识结果
Table 3 Parameter identification results of equivalent model

光伏渗透率 / %	电压降幅 / %	X_S	$s_0 / \%$	P_{m0} / MW	a_p	b_p	c_p	a_q	b_q	c_q	X_D	$E_1 / \%$	$E_2 / \%$
120	20	0.2405	2.1275	45.34	0.0397	0.1247	0.8356	3.8541	2.3983	-5.2524	0.1018	11.95	26.70
	30	0.2421	2.1433	45.12	0.1644	0.4191	0.4165	7.4191	2.4924	-8.9115	0.1026	9.70	27.17
	40	0.2442	2.1652	45.34	0.3604	0.6097	0.0299	7.4326	2.5631	-8.9957	0.1014	14.95	35.68
70	20	0.2443	2.1654	45.52	-0.6226	-0.4252	2.0478	6.7709	2.6018	-8.3727	0.0950	8.24	22.44
	30	0.2439	2.1616	44.61	-0.1233	-0.0972	1.2205	8.9957	3.7607	-11.7564	0.1013	11.18	25.36
	40	0.2437	2.1592	44.96	0.2028	0.3691	0.4281	9.8573	4.8756	-13.7329	0.1015	10.99	20.60
10	20	0.2408	2.1306	45.60	0.9276	0.9808	-0.9084	0.5105	0.1041	0.3854	0.1011	3.69	4.22
	30	0.2443	2.1656	45.47	0.7385	0.8825	-0.6210	0.6513	0.1476	0.2011	0.1018	4.40	5.04
	40	0.2386	2.1080	45.61	0.5911	0.7421	-0.3332	0.7686	0.2263	0.0051	0.0922	5.86	8.64

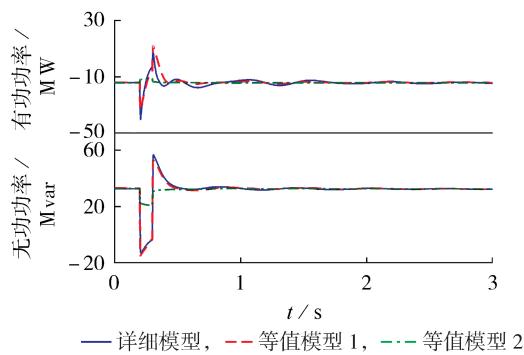


图4 光伏渗透率为 120% 时功率暂态响应拟合图

Fig.4 Fitting diagram of power transient response when photovoltaic penetration is 120%

的功率暂态响应曲线，拟合误差更小。

在电压扰动为 30% 且光伏渗透率为 70%、10% 时，等值模型的功率暂态响应曲线分别见附录中图 A5 和 A6。可见，在不同的光伏渗透率下，本文所提模型均能较好地描述含光伏的配电网广义负荷的暂态特性，验证了本文建模方法的有效性。

4.3 讨论

在故障切除后恢复稳定前的一段时间内，一体化等值模型对配电网有功功率暂态响应曲线的拟合存在一定的误差，配电网功率以较快的速度恢复到稳定值附近并出现衰减振荡，而等值模型功率以较慢的速度恢复到稳定值。这是由于光伏发电系统中针对有功功率波动有相应的有功恢复环节，该环节包含控制反馈系统，在故障切除电压恢复的同时可以较快地调节恢复光伏功率；而等值模型的功率变化则与电压变化直接相关，由图 1(a)母线电压变化曲线可以看出，故障切除后电压在恢复到稳定值前经过了较为缓慢的过渡过程，等值模型的功率响应相应地较为缓慢，这是形成有功暂态响应曲线拟合误差的主要原因。由于等值模型与配电网的有功暂态响应曲线的整体趋势一致，且故障期间误差很小，因此等值模型的整体描述能力较好。

由表 3 可知，在不同的仿真场景下，等值模型动态部分参数及配电网等值阻抗变化较小，参数稳定

性较好。等值模型静态部分为光伏负荷一体化模型，其参数是光伏特性及静态负荷特性的综合体现，在光伏高渗透率下，静态部分参数主要取决于光伏发电系统，即随着光伏渗透率以及电压扰动的变化而变化。在实际应用中，为了增强等值模型的实用性和通用性，可建立不同光伏渗透率及电压扰动下的光伏等值模型参数表，通过式(6)和式(7)的一体化建模公式，结合原综合负荷模型参数，获取配电网广义负荷等值模型的参数值。在模型应用过程中，根据不同的应用场景选择合适的参数进行仿真计算，具有一定的通用性。

对于广义负荷模型结构，本文基于建立用于电网暂态稳定分析的广义负荷模型的目的，在现有的广义负荷模型结构的基础上，对光伏发电系统和配电网负荷进行一体化建模，以简化模型结构，提高仿真效率；在电力系统仿真计算时，可以在仿真软件中直接应用现有的综合负荷模型结构，通过不同的参数取值描述配电网在光伏高渗透率下的广义负荷特性，无需重新搭建新的广义负荷模型。对于光伏发电系统近端口故障、电压跌落程度很大的场景，要准确描述光伏在极限运行状态下的运行特性，应采用综合负荷模型并联光伏发电系统详细模型的模型结构^[16]。

5 结论

本文提出了一种计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模方法。首先根据光伏发电系统类似负荷的特性，建立光伏发电系统的多项式等值模型；然后提出光伏发电系统和静态负荷的一体化建模方法，以多项式一体化模型等效描述光伏发电系统和静态负荷的综合特性；最后，建立配电网广义负荷一体化等值模型结构，即以多项式一体化模型并联感应电动机负荷模型，并基于改进遗传算法，通过扩展参数取值范围实现参数辨识。算例仿真结果验证了本文所提建模方法的有效性，且本文等值模型结构简单，不依赖于光伏发电系统的参数数据，为工程实用仿真提供了参考。笔者后续将研究含有

光伏、风电、储能的配电网等值建模,并考虑光伏发电系统的不同控制方式。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 潘学萍,冯徐徐,鞠平,等.含直驱永磁风电机场的配电网广义负荷建模[J].电力系统自动化,2017,41(4):62-68.
PAN Xueping, FENG Xuxu, JU Ping, et al. Generalized load modeling of distribution network integrated with direct-drive permanent-magnet wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 62-68.
- [2] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [3] KONTIS E O, DIMITRAKOPoulos S P, CHRYSOCHOS A I, et al. Dynamic equivalencing of active distribution grids[C]// 2017 IEEE Manchester PowerTech. Manchester, UK: IEEE, 2017: 1-6.
- [4] 鞠平,王耀,项丽,等.考虑特殊负荷的宁夏电网负荷建模[J].电力自动化设备,2012,32(8):1-4.
JU Ping, WANG Yao, XIANG Li, et al. Load modeling for Ningxia Grid with special loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 1-4.
- [5] 黑晨阳,关远鹏,谢运祥,等.基于戴维南-诺顿等效的含分布式光伏发电系统的配电网仿真分析[J].电力自动化设备,2017,37(10):71-78.
HEI Chenyang, GUAN Yuanpeng, XIE Yunxiang, et al. Simulation analysis of distribution network with distributed photovoltaic generation system based on Thevenin-Norton equivalence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 71-78.
- [6] WOYTE A, THONG V V, BELMANS R, et al. Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 202-209.
- [7] PAPADOPOULOS T A, PAPADOPOULOS P N, ROSCOE A J, et al. Black-box dynamic equivalent model for microgrids using measurement data[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(5): 851-861.
- [8] SAMADI A, SODER L, SHAYESTEH E, et al. Static equivalent of distribution grids with high penetration of PV systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1763-1774.
- [9] 张剑,孙元章.三相单级光伏并网系统对配电网侧负荷建模的影响[J].电力系统自动化,2011,35(2):73-78.
ZHANG Jian, SUN Yuanzhang. Impact of three-phase single-stage photovoltaic system on distribution network load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 73-78.
- [10] 李培强,曾小军,黄际元,等.面向综合负荷的并网光伏发电系统等效建模[J].电力系统自动化,2016,40(8):43-50.
LI Peiqiang, ZENG Xiaojun, HUANG Jiyuan, et al. Equivalent modeling of grid-connected photovoltaic power generation systems for comprehensive load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 43-50.
- [11] ZALI S M, JOVICA V M. Generic model of active distribution network for large power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3126-3133.
- [12] JOVICA V M, ZALI S M. Validation of equivalent dynamic model of active distribution network cell[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2101-2110.
- [13] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模[M].2版.北京:中国电力出版社,2008:41-44,73-78,129.
- [14] 徐振华,李欣然,宋军英,等.考虑双馈风电机的配网广义综合负荷建模[J].电工技术学报,2013,28(7):234-242.
XU Zhenhua, LI Xinran, SONG Junying, et al. Load modeling considering Doubly-Fed Induction Generator(DFIG) integrated into distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 234-242.
- [15] 张剑,孙元章.含有分布式电源的广义负荷建模[J].电网技术,2011,35(8):41-46.
ZHANG Jian, SUN Yuanzhang. Generalized load modeling considering wind generators connected to distribution network [J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 41-46.
- [16] 吴峰,李玮.含高渗透率分布式光伏发电系统的配电网动态等值分析[J].电力系统自动化,2017,41(9):65-70,181.
WU Feng, LI Wei. Dynamic equivalence analysis of distribution network integrated with high-penetration distributed photovoltaic generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 65-70, 181.
- [17] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [18] 高本锋,姚磊,李忍,等.大规模光伏电站并网的振荡模式分析[J].电力自动化设备,2017,37(8):123-130.
GAO Benfeng, YAO Lei, LI Ren, et al. Analysis on oscillation modes of large-scale grid-connected PV power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 123-130.
- [19] 陈道潇,张粒子,杨萌,等.考虑光伏发电功率波动性的AGC备用容量分析方法[J].电力系统自动化,2015,39(22):16-21,52.
CHEN Xiaoxiao, ZHANG Lizi, YANG Meng, et al. A method for AGC reserve capacity analysis considering photovoltaic power fluctuation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 16-21, 52.
- [20] IOANNIS-THOMAS K. Comparison of existing PV models and possible integration under EU grid specifications[D]. Stockholm, Sweden: KTH School of Electrical Engineering, 2011.
- [21] 陈谦,孙建波,蔡敏,等.考虑配电网综合负荷模型的参数确定[J].中国电机工程学报,2008,28(16):45-50.
CHEN Qian, SUN Jianbo, CAI Min, et al. Parameters determination of synthesis load model considering distribution network connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 45-50.
- [22] 贺仁睦,郑晓雨,马进,等.基于轨迹灵敏度的负荷参数辨识范围调整方法[J].电力系统自动化,2009,33(13):17-21.
HE Renmu, ZHENG Xiaoyu, MA Jin, et al. A method of parameter range adjustment in load parameter identification based on the trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 17-21.

作者简介:



吴 峰

吴峰(1977—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要研究方向为可再生能源发电系统的建模与控制、电力负荷建模、电力系统动态等值、基于广域测量系统的电力系统分析与控制等(E-mail:wufeng@hhu.edu.cn);

戴小妹(1995—),女,江苏海安人,硕士研究生,主要研究方向为可再生能源发电系统的建模与仿真(E-mail:daixmwork@163.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第46页 continued on page 46)

附录:

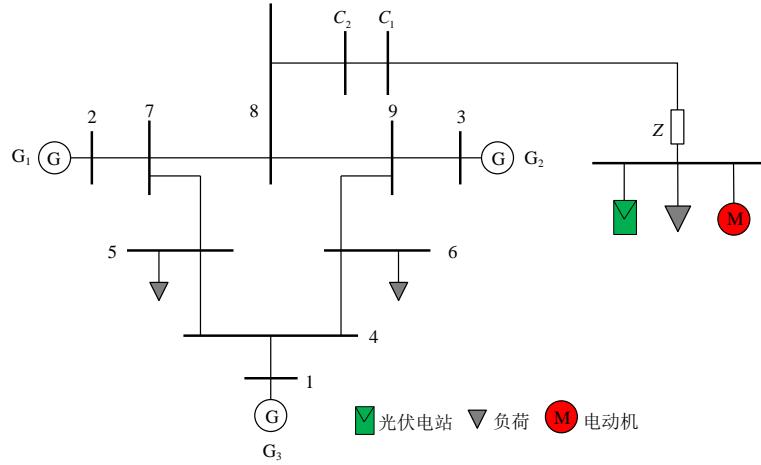


图 A1 光伏发电系统动态特性仿真系统

Fig.A1 Dynamic characteristics simulation system of photovoltaic power generation system

表 A1 静态负荷参数
Table A1 Parameters of static load

有功基准值 P_{s0} /MW	无功基准值 Q_{s0} /Mvar	a_{ps}	b_{ps}	a_{qs}	b_{qs}
17.2596	0.4447	1	0	1	0

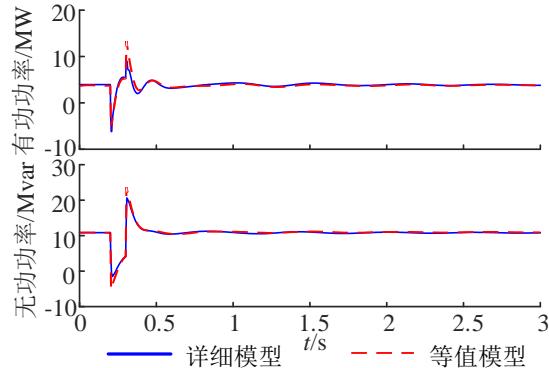


图 A2 一体化建模前后功率暂态响应对比图

Fig.A2 Comparison of power transient response between before and after integrated modeling

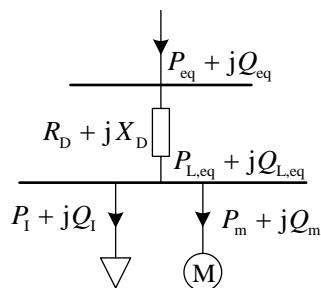


图 A3 配电网广义负荷等值模型结构

Fig.A3 Equivalent model structure of generalized load of distribution network

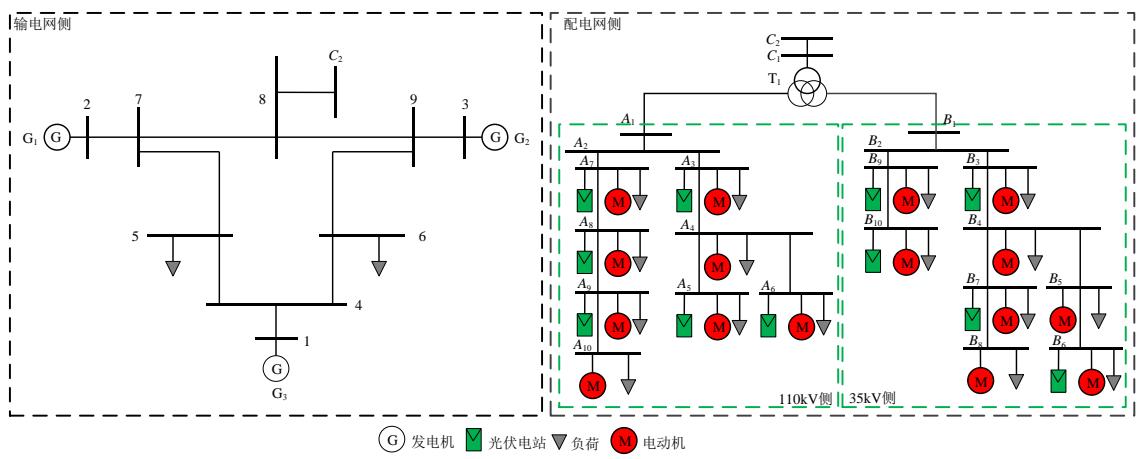


图 A4 仿真系统示意图
Fig.A4 Schematic diagram of simulation system

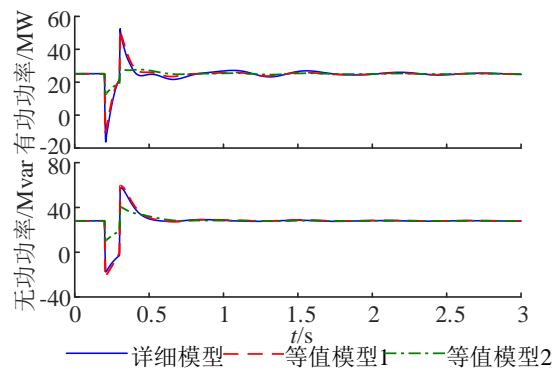


图 A5 70% 光伏渗透率下功率暂态响应拟合图
Fig.A5 Fitting diagram of power transient response with 70% photovoltaic penetration

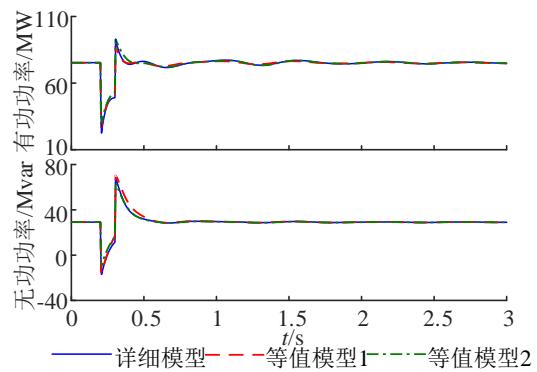


图 A6 10% 光伏渗透率下功率暂态响应拟合图
Fig.A6 Fitting diagram of power transient response with 10% photovoltaic penetration

Multi-energy complement and coordinated post-contingency recovery method of distribution energy networks based on master-slave game theory

MA Tianxiang¹, JIA Boyan¹, LU Zhigang², CHENG Xiao³, WANG Daiyuan⁴

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Key Laboratory of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Hebei Electricity Transmission & Transformation Facilities Company, Shijiazhuang 050051, China;

4. Shijiazhuang Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To solve the post-contingency recovery problem of distribution energy networks, a master-slave game theory-based approach is developed. The post-contingency recovery method of distribution energy networks considers multi-energy complementary and coordination. The strategy of the master problem is to adjust the post-contingency switch state of distribution network, which aims at minimizing the electricity shedding after the recovery of distribution energy networks. The operation strategies of subenergy networks including electricity, heat, natural gas, and transportation sub energy networks are adjusted in the slave problem. This problem minimizes the post-contingency total operation cost of multi-energy networks, and the necessary operational constraints of each sub energy network are considered. Hence, the master player adjusts the post-contingency switch state, while the slave player adjusts the operation strategy of distribution energy networks. Simulative results show that the distribution energy network provides more economic and reliable post-contingency operations in comparison with the traditional distribution network.

Key words: distribution energy networks; post-contingency recovery; master-slave game theory; multi-energy complementary and coordination; demand shedding index

(上接第7页 continued from page 7)

Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic

WU Feng, DAI Xiaomei

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The generalized load model for distribution network considering new energy sources such as photovoltaic is usually formed by paralleling the traditional composite load model with the equivalent model of new energy sources, which makes the model have huge structure and high model order, and parameters difficult to identify. An integrated equivalent modeling method for generalized load of distribution network considering photovoltaic is proposed, which simplifies the model structure and does not depend on the output data of photovoltaic generation system. Based on the theory and simulation analysis of dynamic characteristics of photovoltaic generation system, the polynomial equivalent model of photovoltaic generation system is proposed. The integrated model of photovoltaic generation system and static load of distribution network is established, the value ranges of parameters are extended, and the improved genetic algorithm is adopted to identify the model parameters. The simulative results based on the combined simulation platform of DIgSILENT and MATLAB show that the proposed model can accurately describe the dynamic characteristics of the generalized load of distribution network considering photovoltaic generation system.

Key words: photovoltaic generation system; distribution network; integrated modeling; polynomial model; dynamic characteristic; load modeling; combined simulation