

考虑分布式电源详细模型的配电网多相状态估计

巨云涛¹, 林毅², 王晶³, 葛夫超¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 在传统配电网状态估计中, 主要考虑拓扑约束和线性阻抗元件约束。在大量分布式电源接入配电网后, 关于负序和零序的控制也相应增加。对于三相不平衡的状态估计, 除了线性阻抗元件约束外, 还要考虑分布式电源对不平衡分量即负序和零序的约束方程。因此, 首先建立了常见的分布式电源在状态估计中的模型, 然后提出了基于改进节点法的配电网多相状态估计方法, 最后通过算例分析考虑与不考虑分布式电源的模型对状态估计结果的影响。

关键词: 主动配电网; 多相状态估计; 分布式电源; 改进节点法

Multi-phase distribution state estimation considering detailed models of distributed generators

JU Yuntao¹, LIN Yi², WANG Jing³, GE Fuchao¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Limited Company, Fuzhou 350012, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Traditional distribution state estimation only contains topological constraints and linear impedance branch constraints. With distributed generators (DGs) penetrating into distribution network, lots of negative and zero sequence control equations exist. For unbalance state estimation, there are zero and negative sequence constraints except linear branch constraints. The three-phase distributed generators' models in state estimation are firstly proposed. And then a state estimation method based on modified nodal analysis is proposed and numerical tests' results show the difference between considering and not considering distributed generators' models.

Key words: active distribution network; multi-phase state estimation; distributed generators; modified nodal analysis

0 引言

状态估计(State Estimation, SE)为配电网网络分析与优化提供可靠的基础运行数据, 是配电管理系统(Distribution Management System, DMS)的核心功能^[1-3]。过去配电网负荷缺乏实时量测, 为了保证可观测的条件, 需要增加负荷伪量测才能完成状态估计。随着高级计量架构(Advanced Metering Infrastructure, AMI)的建立、微型相角量测单元(Micro-Phase Measurement Unit, Micro-PMU)^[4]的安装和分布式电源的渗透, 配电网的可观测性得到改善, 状态估计能够基于实时量测完成计算, 只是由于计量通信频率的限制可能为15 min计算一次。为了

增加状态估计计算频率, 文献[5]在15 min间隔中, 将负荷预测的结果作为伪量测, 保证状态估计的求解。

低压配电网可能运行在三相不平衡的状态, 已有不少文献描述了三相不平衡状态估计模型^[6-8]。为了提高配电网状态估计的计算效率, M. E. Baran等^[7]提出以支路复数电流量为待求量的状态估计方法。该方法将各种成对的功率量测转换为复数电流量测, 使得量测雅可比矩阵为常数阵, 提高了计算效率, 但这些方法都存在一个主要问题是仅考虑了输电设备的元件约束, 而未考虑电源对不平衡分量控制的约束。仅将分布式电源的三相功率和电压量测代入到状态估计中, 而忽视了不对称分量的控制约束方程对多相状态估计的结果影响较大。

本文主要贡献包括:

(1) 建立了几种常见的分布式电源并网接口在状态估计问题的模型; 提出一种新的含分布式电

源的配电网相序混合表示方法, 该表示方法将相序混合电路转换为普通电路, 无需更改传统的电路分析程序即可完成相序混合电路的计算。

(2) 分析了分布式电源不对称分量的控制方式对状态估计结果的影响。

1 状态估计模型

本文首先介绍多相状态估计的约束模型, 主要包括网络拓扑约束和元件约束。而元件约束包括线性阻抗元件和常见的分布式电源的约束方程。然后, 本文描述了含等式约束的基于最小二乘的多相状态估计模型。

1.1 拓扑约束

将电网的支路分为两种类型, 一种是恒阻抗线性支路, 用下标 1 标识, 另一种是非恒阻抗线性支路, 用下标 2 标识。网络拓扑约束 KVL 可以表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} A_1^T \\ A_2^T \end{bmatrix} U_{n,re} = \begin{bmatrix} U_{br,1,re} \\ U_{br,2,re} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} A_1^T \\ A_2^T \end{bmatrix} U_{n,im} = \begin{bmatrix} U_{br,1,im} \\ U_{br,2,im} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 表示节点-支路关联矩阵; 下标 n 表示节点类变量; 下标 br 表示支路类变量; 下标 re 和 im 表示实部和虚部。

KCL 可以表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{br,1,re} \\ I_{br,2,re} \end{bmatrix} = 0 \\ \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{br,1,im} \\ I_{br,2,im} \end{bmatrix} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

本文中推导的网络约束描述本质是改进节点法^[8]。虽然本文的求解变量增多, 但由于等式约束具有很高的稀疏性, 仍具有很高的计算效率。文献^[8]指出采用改进节点法描述电网具有与传统节点法近似的计算效率。

1.2 元件约束

1.2.1 恒阻抗线性支路

恒阻抗线性支路满足元件约束:

$$\begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{br,1,re} \\ U_{br,1,im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{br,1,re} \\ I_{br,1,im} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, G, B 是支路的原始导纳矩阵。

将式(3)两边同乘以 $\begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix}$, 代入式(1)、式(2),

可以得到关于节点电压和非恒阻抗支路电流的约束方程:

$$\begin{bmatrix} A_1 G A_1^T & -A_1 B A_1^T \\ A_1 B A_1^T & A_1 G A_1^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n,re} \\ U_{n,im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_2 I_{br,2,re} \\ A_2 I_{br,2,im} \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

1.2.2 分布式电源支路

本文将分布式电源并网接口主要分为四类, 主要包括同步电机并网、异步电机并网、电力电子接口并网和双馈电机接口并网。由于分布式电源满足参数对称的条件, 也就是说分布式电源可以采用序分量来描述。如图 1 所示, 图中虚线表示线路的互感部分, 相分量与序分量的转换通过受控电压源和受控电流源表示, 其中受控电压源和电流源满足的约束方程为

$$\begin{bmatrix} U_{2,0} \\ U_{2,+} \\ U_{2,-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2,a} \\ U_{2,b} \\ U_{2,c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_{2,a} \\ I_{2,b} \\ I_{2,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2,0} \\ I_{2,+} \\ I_{2,-} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, 下标 a, b, c 表示三相, 下标 $0, +, -$ 表示零序、正序和负序。这种表示方法的好处是相序混合电路可以当作一般的电路来分析, 而不再需要相序分离进行分析。

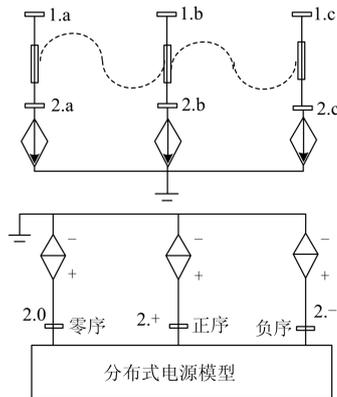


图 1 含分布式电源的配电网相序混合表示方法

Fig. 1 Hybrid phase-sequence schematic diagram of distribution network embedded with distributed generators

1.2.2.1 同步电机

接入配电网的热电联产机组等多采用同步发电机并网^[9]。同步发电机序分量等值网络如图 2 所示。

同步电机正序电压等值电路内电势在状态估计中通常既不是量测量, 也不是已知的参数量, 所以在状态估计问题中, 正序电路约束不加以考虑。当分布式电源的零序和负序内阻抗给定时, 可以将零序电路和负序电路的线性阻抗约束放入状态估计问

题中, 图中的阻抗参数计算方法参见文献[10]。

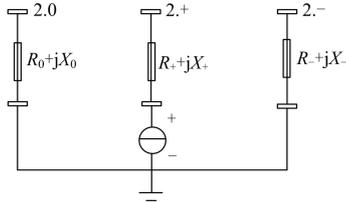


图 2 同步电机序分量模型

Fig. 2 Synchronous generators sequence model

1.2.2.2 异步电机

接入配电网的风机可采用异步电机并网。其序分量等值电路, 如图 3 所示。

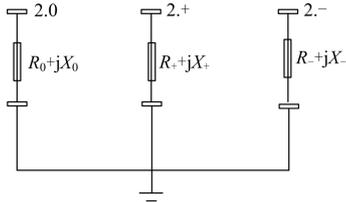


图 3 异步电机序分量模型

Fig. 3 Asynchronous generators sequence model

当分布式电源的正序、零序和负序内阻抗给定时, 可以将线性阻抗约束放入状态估计问题中, 图中的阻抗参数计算方法参见文献[10]。

1.2.2.3 电压源型换流器接口并网

目前大多数分布电源采用柔性的电力电子接口并网。这类电源控制有多种, 这里主要考虑两种^[11], 一种是控制并网接口的三相电流对称, 如图 4 所示, 其零序和负序电流源为 0。

另一种是直流电容器不含二倍工频的分量, 如图 5 所示, 图中虚线表示正序和负序之间互相耦合, 满足约束方程:

$$U_{re,+} I_{re,-} + U_{im,+} I_{im,-} + U_{re,-} I_{re,+} + U_{im,-} I_{im,+} = 0 \quad (7)$$

$$U_{im,-} I_{re,+} - U_{re,-} I_{im,+} - U_{im,+} I_{re,-} + U_{re,+} I_{im,-} = 0 \quad (8)$$

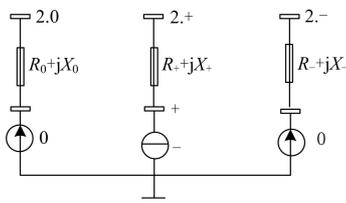


图 4 电力电子接口序分量模型(一)

Fig. 4 Power electronic interface sequence model (1)

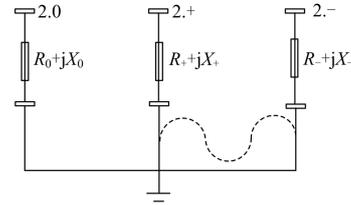


图 5 电力电子接口序分量模型(二)

Fig. 5 Power electronic interface sequence model(2)

1.2.2.4 双馈电机接口并网

双馈电机并网接口的电机主要包括两部分, 这两部分在状态估计中, 一部分为定子侧旋转电机并网, 另一部分为转子侧换流器并网。如图 6 所示, 并网换流器的控制和定子侧控制是独立的, 而前面 1.2.2.3 中已经详细描述了换流器并网的模型, 这里不再详述。因为双馈电机转子侧可通过换流器进行控制, 所以换流器定子侧并网有多种模型, 包括:

(1) 控制定子负序和零序电流为零, 如图 6 所示。

(2) 控制定子侧有功功率二倍工频分量为 0, 如图 7 所示, 图中虚线表示正序和负序之间互相耦合, 满足约束方程式(7)、式(8)。

(3) 控制转子侧负序和零序电流为零, 如图 8 所示, 其中阻抗 $Z_1 = \frac{R_r}{2-s} + jX_r$, R_r 和 X_r 分别为转子侧折算到定子侧的电阻和电抗, $Z_2 = jX_m$, X_m 为励磁阻抗, $Z_3 = R_s + jX_s$ 表示定子阻抗。

(4) 控制转子侧有功二倍工频分量为 0, 如图 9 所示, 图中虚线表示转子折算到定子侧的支路正序和负序之间互相耦合, 满足约束方程式(7)、式(8)。

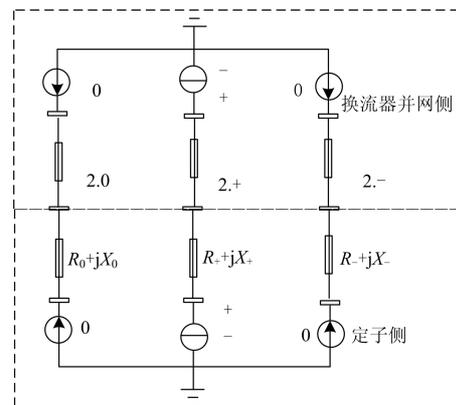


图 6 双馈电机接口序分量模型(一)

Fig. 6 Double fed generators' sequence model (1)

1.3 含等式约束的状态估计模型

选择节点电压的实部和虚部, 非恒阻抗支路的电流实部和虚部作为待求变量。状态估计问题可以描述成^[12]

$$\begin{aligned} \min_x J(x) &= [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \\ \text{s.t. } c(x) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中：待求变量 x 包括 $U_{n, re}$, $U_{n, im}$, $I_{br, 2, re}$, $I_{br, 2, im}$ ； R 是以方差 σ_i^2 为对角元素的量测方差阵； $c(x)$ 表示式(4)。

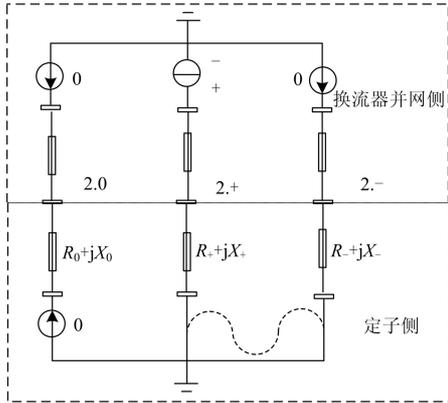


图 7 双馈电机接口序分量模型(二)

Fig. 7 Double fed generators' sequence model (2)

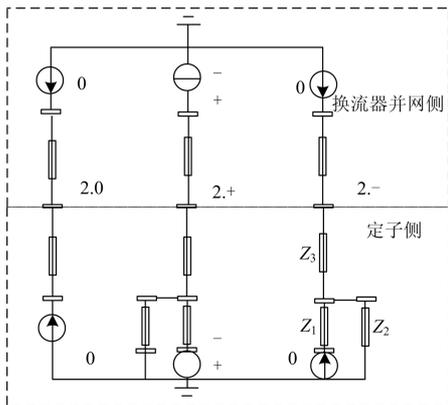


图 8 双馈电机接口序分量模型(三)

Fig. 8 Double fed generators' sequence model (3)

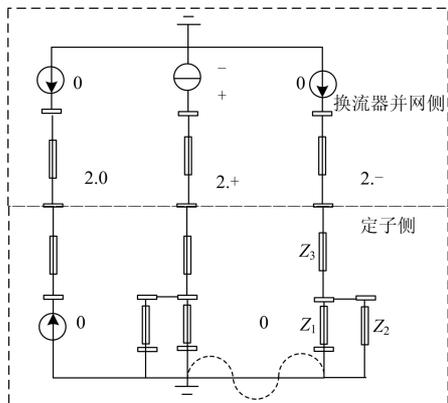


图 9 双馈电机接口序分量模型(四)

Fig. 9 Double fed generators' sequence model (4)

本文采用乘子法求解含等式约束的状态估计问题^[13]，利用乘子法，状态估计问题转换为

$$L(x, \lambda) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] + \lambda^T c(x) \quad (10)$$

其中， λ 表示拉格朗日乘子向量。

状态估计问题的最优性条件为

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -H^T R^{-1} [z - h(x)] + C^T \lambda = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = c(x) = 0 \quad (12)$$

式中： $H = \frac{\partial h}{\partial x}$ 通常称为量测雅可比矩阵；

$C = \frac{\partial c(x)}{\partial x}$ 。采用牛顿法求解方程(11)、(12)，可以得到迭代方程

$$\begin{bmatrix} H^T R^{-1} H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T R^{-1} \Delta z \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中， $\Delta z = z - h(x)$, $\Delta c = -c(x)$ 。

2 算例分析

本文主要用来说明分布式电源接入对配电网多相状态估计的影响，所以设计简单的两节点系统即可阐述清楚，基准电压为 4.16 kV，基准功率为 1 000 kVA。如图 1 所示。线路的三相阻抗参数为

$$\begin{bmatrix} 0.0080+0.0550j & 0.0040+0.0160j & 0.0040+0.0160j \\ 0.0040+0.0160j & 0.0070+0.0550j & 0.0040+0.0160j \\ 0.0040+0.0160j & 0.0040+0.0160j & 0.0080+0.0550j \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

以下算例分为考虑与不考虑分布式电源模型约束两种情况进行状态估计计算。

2.1 同步电机模型

同步电机的负序阻抗为 0.004j p.u.，零序阻抗为 0.02j p.u.。从表 1 结果可以看出，不考虑电源模型约束得到的三相状态估计结果与实际模型存在较大的偏差。

表 1 状态估计考虑与不考虑分布式电源模型对比分析(一)

Table 1 Comparison between state estimation with DGs' model and without DGs' model (1)

	考虑 DG 模型	不考虑 DG 模型
负序电压/电流	$(2+4j) \times 10^{-5} / (0.01-0.005j)$	$(1+3j) \times 10^{-5} / (0.02-0.001j)$
零序电压/电流	$(1+1j) \times 10^{-5} / (0.0005-0.0005j)$	$(2+1j) \times 10^{-5} / (0.002-0.001j)$
与负序参数的差值	0	0.004-0.002j
与零序参数的差值	0	0.002-0.012j

2.2 异步电机模型

异步电机的负序阻抗为 $0.07j$ p.u., 零序阻抗为 $0.07j$ p.u.。从表 2 结果可以看出, 不考虑电源模型约束得到的三相状态估计结果与实际模型存在较大的偏差。

表 2 状态估计考虑与不考虑分布式电源模型对比分析(二)

Table 2 Comparison between state estimation with DGs' model and without DGs' model (2)

	考虑 DG 模型	不考虑 DG 模型
负序电压/电流	$(3+3j)\times 10^{-5}/$ (0.00043+0.00043j)	$(1+3j)\times 10^{-5}/$ (0.02-0.001j)
零序电压/电流	$(1+1j)\times 10^{-5}/$ (0.00143-0.00043j)	$(2+1j)\times 10^{-5}/$ (0.002-0.001j)
与负序参数的差值	0	0.00042-0.0685j
与零序参数的差值	0	0.006-0.062j

2.3 换流器并网模型

换流器的负序阻抗为 $0.0004+0.105j$ p.u., 零序阻抗为 $0.0004+0.105j$ p.u. 换流器控制方式为零序和负序注入电流为 0。从表 3 结果可以看出, 不考虑电源模型约束得到的三相状态估计结果, 其负序和零序不满足为 0 的基本条件, 而这一约束相比于阻抗, 更加容易从分布式电源制造商获得, 所以对于含分布式电源多相状态估计, 需要也比较容易考虑负序和零序控制参数。

表 3 状态估计考虑与不考虑分布式电源模型对比分析(三)

Table 3 Comparison between state estimation with DGs' model and without DGs' model (3)

	考虑 DG 模型	不考虑 DG 模型
负序电流	0	0.02-0.001j
零序电流	0	0.002-0.001j
与负序控制参数的差值	0	0.02-0.001j
与零序控制参数的差值	0	0.002-0.001j

2.4 双馈电机模型

双馈电机的转子电阻为 0.007 p.u., 转子电抗为 0.0717 p.u., 定子电阻为 0.0092 p.u., 定子电抗为 0.0717 p.u., 滑差为 -0.1 。双馈电机定子侧控制方式为零序和负序注入电流为 0, 换流器并网侧控制方式为零序和负序注入电流为 0。从表 4 结果可以看出, 不考虑电源模型约束得到的三相状态估计结果, 其负序和零序不满足为 0 的基本条件, 而这一约束相比于阻抗, 与换流器并网的分布式电源一样, 更加容易从双馈电机铭牌信息获得, 所以多相状态估计, 需要也比较容易考虑双馈电机的负序和零序控制参数。

表 4 状态估计考虑与不考虑分布式电源模型对比分析(四)

Table 4 Comparison between state estimation with DGs' model and without DGs' model (4)

	考虑 DG 模型	不考虑 DG 模型
定子侧负序电流	0	0.012-0.001j
定子侧零序电流	0	0.001-0.002j
定子侧与负序参数的差值	0	0.012-0.001j
定子侧与零序参数的差值	0	0.001-0.002j
换流器侧负序电流	0	0.0002-0.0003j
换流器侧零序电流	0	0.0001-0.0002j
换流器侧与负序参数的差值	0	0.0002-0.0003j
换流器侧与零序参数的差值	0	0.0001-0.0002j

3 结论

本文建立了几种常见的分布式电源在配电网多相状态估计中的模型, 通过算例分析指出分布式电源对不平衡分量的控制为状态估计增加了新的约束, 考虑与不考虑分布式电源的控制对多相状态估计的结果有较大的影响, 同时因为分布式电源通常参数对称, 采用序分量描述, 而配电网采用相分量描述, 本文通过增加受控电压源和电流源, 使得相序模型能在同一个电路中计算, 与普通电路计算一致, 无需修改传统的电路分析程序。

参考文献

- [1] 黄伟, 庞琳, 曹彬, 等. 基于分区分解的配电网状态估计的分布式并行计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 45-51.
HUANG Wei, PANG Lin, CAO Bin, et al. Parallel and distributed computing for an area-decoupled state estimation method for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 45-51.
- [2] 王少芳, 刘广一, 郎燕生, 等. 基于预测残差的配电网三相状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 51-56.
WANG Shaofang, LIU Guangyi, LANG Yansheng, et al. Study on three-phase state estimation for distribution networks based on residual prediction[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 51-56.
- [3] 李静, 罗雅迪, 赵昆, 等. 考虑大规模风电接入的快速抗差状态估计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 113-118.

- LI Jing, LUO Yadi, ZHAO Kun, et al. Research of fast and robust state estimation considering large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 113-118.
- [4] MEIER A V, CULLER D, MCEACHERN A, et al. Micro-synchrophasors for distribution systems[C] // 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, 19-22 Feb, 2014.
- [5] HUANG SC, LU C N, LO Y L. Evaluation of AMI and SCADA data synergy for distribution feeder modeling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1639-1647.
- [6] HANSEN C W, DEBS A S. Power system state estimation using three-phase models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 818-824.
- [7] BARAN M E, KELLEY A W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 483-491.
- [8] THERRIEN F, KOCAR I, JATSKEVICH J. A unified distribution system state estimator using the concept of augmented matrices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3390-3400.
- [9] CHEN T H, CHEN M S, INOUE T, et al. Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1671-1681.
- [10] 巨云涛, 吴文传, 张伯明, 等. 分布式电源三相稳态模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1509-1518.
- JU Yuntao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Three-phase steady-state models for distributed generators[J]. Proceedings of CSEE, 2014, 34(10): 1509-1518.
- [11] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.
- [12] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static state estimation, part I, II and III[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89: 104-135.
- [13] LIN W M, TENG J H. State estimation for distribution systems with zero-injection constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 518-524.

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2016-07-26

作者简介:

巨云涛(1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为非线性电路建模、优化与控制。E-mail: juyuntaomail@163.com

(编辑 张爱琴)