

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.023

计及网损最小的电网简化方法

刘庆涛,周 辉,邱 惠*

(国网湖北省电力公司 鄂州供电公司,湖北 鄂州 436000)

摘要:针对风电、光伏等可再生能源不断并入电网,以及特高压直流的大力发展,使电网的规模越来越大从而增加了电网无功电压的控制难度的问题,提出了采用蒙特卡洛方法模拟电网实际运行状态,使用非线性最小二乘回归方法获得了有功损耗与节点有功注入、无功注入之间的权重,从而形成了电网有功损耗模型。针对该模型,以电网有功损耗为目标,通过对电网中的各个节点进行了分区优化,从而获得了最符合电网运行实际的节点分区结果。对 IEEE39 母线系统进行仿真测试。结果表明,所提方法能够实现 98% 的电压预测精度,说明该电网简化方法有助于提高新形势下电网无功电压的监视和控制精度。

关键词:电网;损耗;简化;电压;电网结构

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0669-05

Power grid reduction method considering the power active loss

LIU Qing-tao, ZHOU Hui, QIU Hui

(Ezhou Power Supply Company of State Grid Hubei Electric Power Company, Ezhou 436000, China)

Abstract: Aiming at the situation of renewable energy, such as wind, photovoltaic and so on, merged into the power grids, and the development of the extra-high voltage, the power grid scale was becoming much bigger, it was difficult to control the voltage getting much bigger. In order to solve the problem, the Monte Carlo method was used to simulate the power system real station, and the nonlinear least squares was set to establish relation between the active power loss and active power injection, reactive power injection. The model of power grid active loss could be get. Aiming at the objective, passing through the nodes in grids partition optimization, the result of accord with the real situation was gotten. The simulation test of the IEEE39 buses system was presented. The results indicate that the experimental results verify the forecast accuracy of the proposed method reaches 98%. So the effectiveness of voltage monitoring and controlling is proving and suit to the new power system condition.

Key words: power grid; power loss; reduction; voltage; power grid construction

0 引 言

随着电网规模的日益增大,电网节点数量在逐步增大,从而使电网节点电压的监控以及发生危险时的控制效率变得越来越低下。

对此,国内外学者提出了一系列的解决方法:如文献[1]通过建立多时段动态优化潮流模型来调控发电机有功和无功出力;文献[2]通过使用网络等值技术估计由电力系统不同分区故障导致的用户负荷不可靠成本指标;文献[3-4]将复杂电网分区,调控故障所属

分区,其他分区则等值简化;文献[5]为了分析复杂电网潮流变化对电价的影响,提出了动态分区的概念;文献[6-7]提出电网无功分区优化的算法,提高了无功优化控制的性能。

然而,目前的解决方法主要集中在利用电网节点之间距离的思路对电网进行分区无功电压控制,从而提高电压的控制效率。这种做法仅仅从电网的图形结构来考虑分区,以实现二级电压控制,这种控制效果是静态的,没有充分考虑电网的实际运行状态效果。

针对该问题,本研究在考虑电网结构的基础上,以

收稿日期:2016-12-13

作者简介:刘庆涛(1977-),男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,主要从事电力系统及自动化方面的研究. E-mail: zgm12315@163.com

通信联系人:邱 惠,女,高级工程师. E-mail: 770673133@qq.com

电网运行的网损最小为目标,提出了电网简化分区的新方法。

1 电网有功损耗模型

1.1 蒙特卡洛法模拟电网运行

设系统共有 n 个节点,每个节点为纯发电节点或纯负荷节点,且其在置信区间内服从均匀分布:

$$\begin{cases} P_{Gi} \sim U(P_{Gi}, \bar{P}_{Gi}) & (i = 1, 2, \dots, NG) \\ P_{Dj} \sim U[\underline{P}_{Dj}, \bar{P}_{Dj}] & (j = 1, 2, \dots, ND) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{Gi} — 发电机节点 i 的有功输出; $\bar{P}_{Gi}, \underline{P}_{Gi}$ — 其上、下限; NG — 发电机节点的总数; P_{Dj} — 负荷节点 j 的有功; $\bar{P}_{Dj}, \underline{P}_{Dj}$ — 其上、下限; ND — 负荷节点的总数。

本研究使用序贯蒙特卡洛方法每隔 15 min 采集一组样本,并进行连续潮流计算,可得到一天 96 组系统网损与节点有功、无功的数据样本。

1.2 非线性最小二乘回归

本研究使用收敛速度较快的高斯 - 牛顿法对采集的 96 组样本数据进行非线性最小二乘回归。

设待回归模型为:

$$\begin{cases} p_{Li} = f(\vec{x}_i, \vec{\psi}) + \varepsilon_i & (i = 1, 2, \dots, N) \\ f(\vec{x}_i, \vec{\psi}) = \vec{x}_i^T \Psi \vec{x}_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: \vec{x}_i — 第 i 组节点有功、无功数据向量; $\vec{x}_i = [\vec{p}_i \quad \vec{q}_i]$; p_{Li} — 对应的网损,为待估权值矩阵; $\vec{\psi}$ — 其按行展开的行向量; ε_i — 误差; N — 样本总数。

设 $\vec{g}^{(0)} = (g_1^{(0)}, g_2^{(0)}, \dots, g_{2n}^{(0)})$ 为待估回归权值 $\vec{\psi} = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{2n})$ 的初始值,将 $f(\vec{x}_i, \vec{\psi})$ 在 $\vec{g}^{(0)}$ 点附近作泰勒展开,并略去非线性回归模型的二阶及二阶以上的偏导数项,得:

$$f(\vec{x}_i, \vec{\psi}) \approx f(\vec{x}_i, \vec{g}^{(0)}) + \sum_{k=1}^{2n} \left[\frac{\partial f(\vec{x}_i, \vec{\psi})}{\partial \psi_k} \right]_{\vec{\psi}=\vec{g}^{(0)}} (\psi_k - g_k^{(0)}) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)并移项得:

$$p_{Li} - f(\vec{x}_i, \vec{g}^{(0)}) \approx \sum_{k=1}^{2n} \left[\frac{\partial f(\vec{x}_i, \vec{\psi})}{\partial \psi_k} \right]_{\vec{\psi}=\vec{g}^{(0)}} (\psi_k - g_k^{(0)}) + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\text{令 } p_{Li}^{(0)} = p_{Li} - f(\vec{x}_i, \vec{g}^{(0)}), D_{ik}^{(0)} = \left[\frac{\partial f(\vec{x}_i, \vec{\psi})}{\partial \psi_k} \right]_{\vec{\psi}=\vec{g}^{(0)}},$$

$\beta_k^{(0)} = \psi_k - g_k^{(0)}$, 则:

$$p_{Li}^{(0)} \approx \sum_{k=1}^{2n} D_{ik}^{(0)} \beta_k^{(0)} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

对应的矩阵形式为:

$$P_L^{(0)} \approx D^{(0)} B^{(0)} + \varepsilon \quad (6)$$

用最小平方法对式(6)估计修正因子 $B^{(0)}$:

$$b^{(0)} = (D^{(0)'} D^{(0)})^{-1} D^{(0)'} P_L^{(0)} \quad (7)$$

则迭代过程为:

$$g^{(k+1)} = g^{(k)} + b^{(k)} \quad (8)$$

给定允许误差率 ζ , 使用残差平方和检验第 k 次迭代精度:

$$SSR^{(k)} = \sum_{i=1}^n [P_{Li} - f(X_i, g^{(k)})]^2 \quad (9)$$

当满足 $(SSR^{(k)} - SSR^{(k-1)})/SSR^{(k)} \leq \zeta$ 时停止迭代计算, 否则, 继续上述步骤。

1.3 回归权值矩阵

经过高斯 - 牛顿法最小二乘回归, 得到网损与节点有功、无功的学习模型:

$$P_L = [P^T \quad Q^T] \Psi \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: P, Q — 节点有功、无功; P_L — 有功总网损; Ψ — 实对称权值矩阵。

Ψ 表示为:

$$\Psi = \begin{bmatrix} M & N \\ -N & M \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: M — $n \times n$ 实对称矩阵; N — $n \times n$ 负实对称矩阵, 且 $N_{ij} \approx 0 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。

则上式可近似表示为:

$$\Psi \approx \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)可得:

$$P_L \approx P^T M P + Q^T M Q \quad (13)$$

2 计及网损最优的简化方法

本研究根据网损学习模型, 建立以网损最优为目标的电网简化模型。

2.1 优化模型

设电力网络共有 n 个节点, 每个节点在 \mathcal{R}^n 空间中对一个 n 维坐标, 为了使坐标点之间距离加权和最小, 本研究通过正交变换将 \mathcal{R}^n 空间中的 n 个点置入其子空间 $\mathcal{R}^k (k \leq n)$ 中, 数学上, 该问题称为二次置入优化问题^[8-9], 建模为:

$$\begin{aligned} \min: F &= \sum_{i=1}^k \vec{x}_i^T \Phi \vec{x}_i \\ \text{s. t. } \vec{x}_i^T \vec{x}_j &= \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: \vec{x}_i — k 个 n 维的坐标向量, $\vec{x}_i (i = 1, 2, \dots, k)$; Φ — 实对称权值矩阵。

使用拉格朗日乘数法求解上述优化问题:

$$L = \sum_{i=1}^k \vec{x}_i^T \Phi \vec{x}_i - \sum_{i=1}^k \lambda_i (\vec{x}_i^T \vec{x}_i - 1) \quad (15)$$

式中: λ_i — 拉格朗日乘子, $i = 1, 2, \dots, k$ 。

对式(15)的 \vec{x}_i 求偏微分得:

$$(\Phi - \lambda_i I)\vec{x}_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (16)$$

进一步表示为:

$$\Phi \vec{x}_i = \lambda_i \vec{x}_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (17)$$

式中: $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, k)$ — Φ 阵的 k 个特征值; $\vec{x}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ —其对应的特征向量。

将式(17)两边左乘 \vec{x}_i^T 且根据 $\vec{x}_i^T \vec{x}_i = 1$,得:

$$\vec{x}_i^T \Phi \vec{x}_i = \lambda_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (18)$$

因此,式(14)中的优化模型可改写为:

$$\min: F = \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (19)$$

由式(19)可以看出,目标函数取极值的条件是取 Φ 矩阵 k 个最小的特征值,不妨设为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ($\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$),其对应的特征向量记为 $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_k$ 。由于 k 个特征向量满足相互正交约束条件,构成了 R^k 空间的基。

由于网损模型的优化问题即为二次置入问题, P 或 Q 矩阵即为式(14)中节点坐标向量 \vec{x}_i , M 为式(14)中的实对称权值矩阵 Φ ;因此可得到网损取极小值情况下节点有功 P 或无功 Q 的坐标,据此坐标可对电网进行简化。

2.2 电网简化

根据上述优化模型获得的节点坐标,本研究通过改进文献[10]中的使误差下降的节点归属,简化寻优、误差迭代因子的修正表达,实现电网简化。

2.2.1 预处理

由于 \mathcal{R}^n 空间中的坐标点投影至子空间 \mathcal{R}^k 时,会造成坐标信息丢失及量级变化,需要对投影后的点坐标进行处理:

$$x'_i = -\lg |x_i| \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

$$x''_i = \frac{x'_i}{\max(x'_i)} \quad (21)$$

式中: x_i —节点 i 从 \mathcal{R}^n 投影至 \mathcal{R}^k 后的坐标; x''_i —其归一化后的坐标。

2.2.2 最优简化个数

首先本研究寻求电网最优的简化个数,具体步骤是将电网初始分为两个区,将误差较大的区继续一分为二,以此迭代,直至误差不再减小或者减小至一个阈值。

设 A_s^i 表示点 i 的第 s 个坐标, N_m 表示简化 m 内节点数, C_i 表示包含节点 i 的简化; B_s^m 表示类 m 的第 s 个坐标,为类 m 内所有节点的第 s 个坐标的均值,即:

$$B_s^m = \frac{(\sum_{i \in m} A_s^i)}{N_m} \quad (22)$$

定义节点 i 与类 m 的距离为:

$$D_i^m = \left[\sum_{s=1}^k (A_s^i - B_s^m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

定义总简化误差为:

$$e(k, n) = \sum_{i=1}^n (D_i^{C_i})^2 \quad (24)$$

设 S_i 表示点 i 的坐标和,即:

$$S_i = \sum_{s=1}^k A_s^i \quad (25)$$

定义分两类模型 C_i 为:

$$C_i = \min[2, T_i] \quad (26)$$

$$T_i = \left[1 + \frac{2(S_i - S_{\min})}{S_{\max} - S_{\min}} \right] \quad (27)$$

式中: $T_i = [a]$ —取 a 的整数部分; S_{\min}, S_{\max} — $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的最小值和最大值。

则定义分 k 个类的总误差为:

$$E_k = (1 + |k - k_d|) e(k, n) \quad (28)$$

式中: k_d —期望简化个数。

当 $E_k \leq E_{k+1}$ 或者 $E_k \leq \kappa$ 时(κ 为较小值),此时简化个数 k 为最优的简化数 k^* 。

2.2.3 简化优化

本研究根据获得的最优简化个数 k^* ,进一步将各个简化的节点进行优化使总误差最小。具体做法是:依次将第 $k (k = 1, 2, \dots, k^*)$ 简化中的节点 $i (i = 1, 2, \dots, N_k)$ 移至使总误差减少最大的 $k' (k' \neq k)$ 简化。

在移动过程中,节点 i 从简化 k 移出会使 k 区误差减少,记为 Δe^- ,节点 i 移至 k' 类会使 k' 类误差增大,记为 Δe^+ ,则总误差变化量为 $\Delta e(k, n) = \Delta e^- + \Delta e^+$, Δe^- 、 Δe^+ 分别定义如下:

$$\Delta e^- = (D_i^k)^2 - (D_{0i}^k)^2 \quad (29)$$

$$\Delta e^+ = (D_i^{k'})^2 - (D_{0i}^{k'})^2 \quad (30)$$

式中: D_{0i}^k —点 i 从 k 类移出前的距离, D_i^k —移出后的距离, $D_{0i}^{k'}$ —点 i 移入 k' 区前的距离, $D_i^{k'}$ —移入后的距离。

重复迭代,直至移动任意一个节点不再减少总误差为止。

3 实验仿真

3.1 实验步骤

(1) 使用蒙特卡洛方法模拟电网发电、负荷数据,并进行连续潮流计算,得到多时段电网全景信息;

(2) 使用高斯-牛顿法对系统网损及节点有功、无功数据进行回归,得到网损与系统节点有功、无功之间的权值矩阵 M ;

(3) 输入电网简化期望数 k_d 、总简化误差 κ ;

(4) 计算 M 矩阵前 k_d 个最小特征值对应的特征向量,得到 n 个点在 k_d 维空间中的投影坐标;

(5) 应用式(20 ~ 21) 对投影坐标进行归一化处理;

(6) 根据式(22 ~ 28) 获取电网最优简化数 k^* ;

(7) 根据 2.2.3 节优化 k^* 个简化内节点,使总误差最小。

3.2 IEEE-39 节点算例

IEEE10 机 39 节点新英格兰电力系统如图 1 所示。30,33,34,35 为分布式发电机节点。

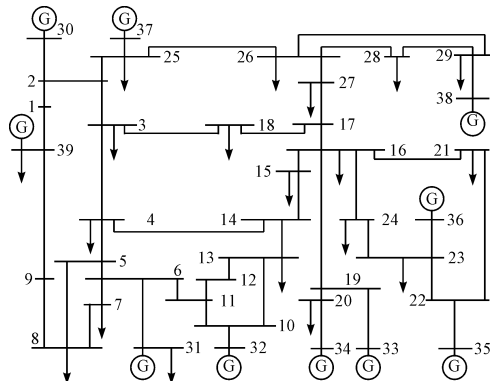


图 1 分布式并网的新英格兰系统

根据文献[10],其机组参数如表 1 所示。31,32,36,37,38,39 为常规发电机节点。

表 1 IEEE39 分布式机组参数

机组	有功上限 / 标么值	有功下限 / 标么值
30	0	4
35	0	5
34	0	5.5
33	0	7

本研究使用蒙特卡洛法每隔 15 min 模拟系统一天内发电、负荷数据,并进行潮流计算,可得到 96 组网损、节点有功、无功数据并作为已知电网运行信息。

建立仿真模型为:

$$y = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^{2n} a_i b_j x_i x_j \quad (31)$$

式中: $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ —节点有功数据; $x_i (i = n + 1, n + 2, \dots, 2n)$ —节点无功数据; a_i, b_j —回归系数。

本研究将前 78 组数据作为回归训练数据,后 16 组样本作为测试数据,使用 MATLAB、VC、1stOpt1.5 软件混合编程,初始值采用随机数,经过 30 次迭代,均方差(RMSE)达到 $1.076\ 793\ 137\ 426\ 17E-12$,残差平方和(SSR)为 $9.043\ 970\ 994\ 303\ 08E-23$,相关系数(R)为 1。

由于第 92 (图 2 横轴点 14) 组样本(网损为 31.746 6)与其他样本数据(网损为 1 左右)相差较大,引起的误差也较大。

系统网损与节点有功-无功的系统矩阵表征了电力网络的拓扑结构以及发电与负荷之间的关联关系,据此关系对电网进行简化,可以有效实现资源最优互补和关联,并实现区域电压控制。本研究使用高斯-牛顿法、粒子群算法、遗传算法对回归系数矩阵 Ψ 进行测试,测试结果如图 2 所示。

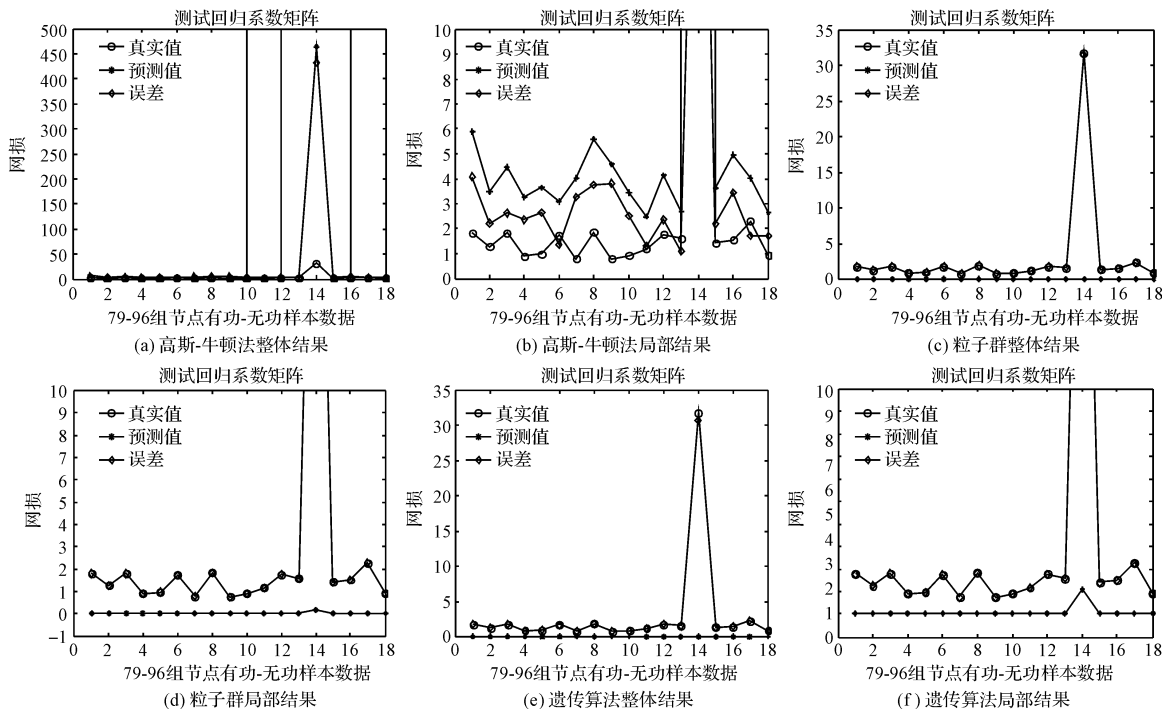


图 2 回归系数矩阵测试结果

4 结束语

本研究提出了一种新的电网简化方法,可用于电

网规模较大时的场合,如省级电网、国家级电网等。在该应用下,可用于将电网划分为若干个小型的微电网,有助于提高电网无功电压的安全监视、管理和控制的

效率。通过对 IEEE39 标准系统的仿真表明,使用斯-牛顿法、粒子群算法、遗传算法等多种方法获得的预测得到节点无功电压水平模型精度能够达到 98%,精度较高,有助于安全监视和控制策略的实施。

后续将进一步展开快速电压的控制策略的研究工作。

参考文献 (References):

- [1] 陈金富,陈海焱,段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报,2006,26(3):31-35.
- [2] WANG P, BILLINTON R, GOEL L. Unreliability cost assessment of an electric power system using reliability network equivalent approaches[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2002,17(3):549-556.
- [3] 倪向萍,张雪敏,梅生伟. 基于复杂网络理论的切机控制策略[J]. 电网技术,2010,34(9):35-41.
- [4] 程新功,厉吉文,曹立霞,等. 基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):109-113.
- [5] 林 骞,李宏仲,胡晓东,等. 地区电网无功分区分层控制

中的组合分支定界算法[J]. 上海电力学院学报,2012,28(1):54-58.

- [6] HALL K M. An r-dimensional quadratic placement algorithm[J]. **Manage. Sci.**,1970,17(3):219-229.
- [7] ALPERT C J, YAO S Z. Spectral partitioning: the more eigenvectors, the better[J]. **Proc. ACM/IEEE Design Automation Conf.**,1995,90(3):195-200.
- [8] CHENG C K, KUH E S. Module placement based on resistive network optimization[J]. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**,1984,3(3):218-225.
- [9] QUINTANA V H, MULLER N. Partitioning of power networks and applications to security control[J]. **IEEE Proceedings-C, Generation, Transmission and Distribution**,1991,138(6):535-545.
- [10] PEIKHERFEH M, SEIFI H, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. Optimal dispatch of distributed energy resources included in a virtual power plant for participating in a day-ahead market [C]//Clean Electrical Power(ICCEP), 2011 International Conference on Digital Object Identifier, Ischia: IEEE, 2011.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

刘庆涛,周 辉,邱 惠. 计及网损最小的电网简化方法[J]. 机电工程,2017,34(6):669-673.

LIU Qing-tao, ZHOU Hui, QIU Hui. Power grid reduction method considering the power active loss[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(6):669-673.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 663 页)

- [4] 彭小圣,邓迪元,程时杰,等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):503-511.
- [5] 孙柏林. “大数据”技术及其在电力行业中的应用[J]. 电气时代,2013(8):18-23.
- [6] 李振元,李宝聚,王泽一. 大数据技术对我国电网未来发展的影响研究[J]. 吉林电力,2014,42(1):10-13.
- [7] McKinsey Global Institute. Big data; the next frontier for innovation, competition, and productivity [M]. New York: McKinsey Global Institute, 2011.
- [8] 中国电机工程学会信息化专委会. 中国电力大数据发展白皮书[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [9] 王德文. 基于云计算的电力数据中心基础架构及其关键技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):67-71.
- [10] 王德文,宋亚奇,朱永利. 基于云计算的智能电网信息平台[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):7-12.
- [11] 张 沛. 电力大数据应用现状及前景[J]. 电气时代,

2014(12):24-27.

- [12] 张东霞,苗 新,刘丽平,等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(1):2-12.
- [13] 于恒友,刘 波,彭子平. 基于 HBase 的输电线路综合数据存储方案设计[J]. 电力科学技术学报,2014,29(2):58-64.
- [14] 康 毅. HBase 大对象存储方案的设计与实现[D]. 南京:南京大学软件学院,2013.
- [15] 黄晓云. 基于 HDFS 的云存储服务系统研究[D]. 大连:大连海事大学交通运输管理学院,2013.
- [16] 宋亚奇,刘树仁,朱永利,等. 电力设备状态高速采样数据的云存储技术方案[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):150-156.
- [17] 韩 晶. 大数据服务若干关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学计算机学院,2013.

[编辑:李 辉]