

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.01.001

# 基于粒子群算法的负荷模型参数辨识研究

刘影<sup>1</sup>, 谢驰<sup>2</sup>, 张有润<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学能源科学与工程学院, 四川 成都 611731; 2. 四川大学锦城学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 针对负荷模型的稳定性直接影响电力系统分析计算的可靠程度问题, 提出了将粒子群算法与分散协调控制相结合的负荷模型参数辨识方法。该负荷模型参数辨识方法根据负荷节点的电压变化情况, 通过粒子群优化对含负荷控制的目标函数进行校正, 使得模型参数在辨识迭代过程中获得全局最优值, 达到负荷模型的最佳稳定性, 并通过计算机仿真证实所提出方法能够提高负荷模型的稳健性。

**关键词:** 粒子群算法; 负荷模型; 参数辨识; 协调控制; 仿真分析

**Abstract:** For the problem that the stability of load model will directly affect the reliability of power system analysis and calculation, a new parameter identification method for load model is proposed by combining the particle swarm algorithm with the decentralized coordinated control. In the model parameter identification method, the voltage change of load nodes will be considered, and the objective function of load control can be corrected by particle swarm optimization, and the global optimal value for the model parameters can be obtained in the iterative process of identification. Therefore, the best stability of the load model can be achieved. Finally, the simulation results show that the proposed method can effectively improve the identification precision and the robustness of load model.

**Key words:** particle swarm algorithm; load model; parameter identification; coordinated control; simulation analysis

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0001-05

## 0 引言

电力系统中的数字仿真已经成为电力系统规划设计、调度运行和计算分析的主要工具,但是由于电网中的负荷常具有时变性和随机性的特点,因此负荷模型的不确定性对电力系统的仿真结果造成了极大的影响<sup>[1]</sup>。在2001年东北、华北交流联网时,数值仿真分析表明联网后东北电网稳定水平大幅度下降,而东北电网两次500 kV短路试验却表明,即使在严重故障情况下,系统依然保持稳定<sup>[2]</sup>。同样,1996年8月美国西部电网发生了解列大停电事故,但是仿真结果却为“十分稳定”<sup>[3]</sup>。2006年11月欧洲电网解列,损失负荷14 600 MW,而事故前3个不同电网运行部门进行的针对性仿真结论却是系统处于“安全的重负荷状态”<sup>[4]</sup>,这些都充分说明了提高电网仿真负荷模型准确度的重要性和迫切性。

目前,主要的负荷建模方法有综合负荷建模方法、基于测量的负荷建模方法和故障仿真方法<sup>[5-6]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金(61401075)

其中,基于测量的负荷建模方法由于能够有效地描述负荷动态特性,在中国已经被广泛应用,但是这种方法要求实时采集电网中的被测数据,因此该建模方法对电网特性的稳健性要求较高<sup>[7-8]</sup>。为了给负荷建模提供丰富的数据源,文献[8]提出了基于相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)的负荷建模方法,该方法利用广域测量技术能够实时获取被测数据信息。由于电力系统是一个典型的复杂非线性广域系统,传统的潮流计算方法(例如牛顿-拉夫逊法)已经受到影响<sup>[9]</sup>。文献[10]指出负荷的大小和负荷节点位置会对电网电压分布产生影响。文献[11]提出了一种基于分布式发电的负荷模型潮流计算方法,该方法能解决电网中病态潮流问题,但需要做大量的计算工作<sup>[12]</sup>。文献[13]提出了基于灵敏度补偿的稳态负荷模型,但是在负荷节点受到电压暂降影响时所呈现出的复杂动态特性,使得计算量增大。

结合电网特性研究稳健负荷模型结构,提出根据系统负荷节点的电压变化,通过分散协调控制策略和粒子算法动态修正模型参数,达到提高负荷模

型参数辨识的精度和稳定性。

## 1 分散协调控制下的负荷模型分析

在电力系统稳健性研究中,广泛地采用以感应电动机作为主要动态负荷的综合负荷模型(time variant adaptive model, TVAM)<sup>[14-15]</sup>。考虑负荷直接联接在电网母线侧,采用三阶感应电动机预测模型,其状态方程和输出方程如下<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega^2 + C)T_0 - (e_d I_d + e_q I_q)] \\ \frac{de_q}{dt} = -\frac{1}{T} [e_q - (x - x')I_d] + (\omega - 1)e_d \\ \frac{de_d}{dt} = -\frac{1}{T} [e_d - (x - x')I_q] + (\omega - 1)e_q \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{R_s^2 + x^2} [R_s(u_d - e_d) + x'(u_q - e_q)] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + x^2} [R_s(u_q - e_q) - x'(u_d - e_d)] \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中: $A$ 、 $B$ 和 $C$ 为电机机械转矩特性参数,在标么值条件下满足 $A + B + C = 1$ ;  $H$ 、 $T$ 、 $T_0$ 分别为感应电动机的惯性常数、额定转矩和暂态转矩;  $x$ 和 $x'$ 分别为感应电动机稳态电抗和暂态电抗;  $I_d$ 、 $I_q$ 为流过感应电动机电流的交、直轴分量;  $x_s$ 为定子绕阻漏抗;  $x_m$ 为励磁电抗;  $x_r$ 为转子漏抗;  $R_r$ 为转子电阻;  $R_s$ 为定子电阻;  $u_d$ 、 $u_q$ 分别为所测配电网中负荷母线上的电压分量值。同时,负荷模型中静态部分表示为

$$\begin{cases} \frac{P}{P_0} = k_{p2} \left(\frac{U}{U_0}\right) + k_{p1} \left(\frac{U}{U_0}\right) + k_{pp} \\ \frac{Q}{Q_0} = k_{q2} \left(\frac{U}{U_0}\right) + k_{q1} \left(\frac{U}{U_0}\right) + k_{qp} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $k_{p2} + k_{p1} + k_{pp} = 1$ 和 $k_{q2} + k_{q1} + k_{qp} = 1$ ;  $P_0$ 、 $Q_0$ 和 $P$ 、 $Q$ 分别为所测负荷点在暂态过程开始时和暂态过程中所消耗的有功功率和无功率值;  $U$ 、 $U_0$ 分别为在暂态过程中负荷母线的电压值和初始值。

由于电力系统是一个典型的高维动态大系统,其具有较强的非线性、时变性特点,其可以等效为感应电动机综合负荷模型,然而该综合负荷模型的稳健性常受到电压暂态过程的影响。将电压暂降过程分为5个阶段:电压暂降前、电压暂降开始、电压暂降持续、电压暂降恢复和电压暂降后,如图1所示。在图1中 $t_0$ 表示发生故障时刻, $t_1$ 表示电压暂降到

最低时刻, $t_2$ 表示故障清除时刻, $t_3$ 表示系统电压恢复时刻。

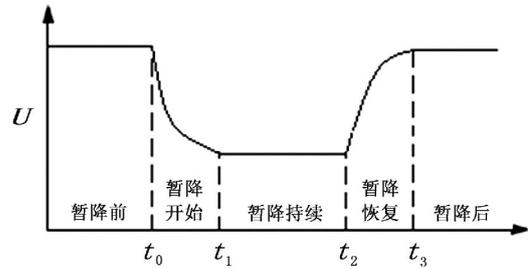


图1 电压暂降过程

设电力系统中的负荷节点个数为 $N$ ,则综合负荷模型在考虑节点分散协调控制下的输出方程为

$$Y(t) = \sum_{i=1}^N \xi_i(t) X_i(t), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中 $X_i(t)$ 、 $Y_i(t)$ 和 $\xi_i(t)$ 分别为系统中第 $i$ 节点的状态向量、输出向量和控制向量。实际运行中,电力系统中各负荷节点的三相电源电压一般是对称的,但是当电网接有较大单相负载或电网发生不对称故障时,某一节点的电压不再对称,将对含感应电动机的综合负荷模型仿真结果带来一定影响。在电压暂降阶段,由于感应电动机负荷作为电压源阻碍电压幅值立即下降到最低,在这期间感应电机的电磁转矩将减小,转差将增大,转速将降低。在电压暂降恢复阶段,感应电动机开始加速并阻碍电压幅值的立即恢复<sup>[17-18]</sup>。

感应电动机转差模型为 $ds/dt = [T_m - T_e]/T_J$ ,式中 $T_J$ 为感应电机转子在额定转矩作用下,从静止到额定转速所需的惯性时间。假设感应电机机械转矩 $T_m$ 恒定,电磁转矩为

$$T_e = \frac{U^2/x_r}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} \quad (5)$$

式中 $s_{cr} = R_r/x_r$ 为感应电机的临界转差。当感应电机在转差 $s_0$ 附近稳态运行,线性化感应电机的暂态电磁转矩分量,有

$$\Delta T_e = \xi \times \Delta s \quad (6)$$

则在电压暂态过程中综合负荷模型的控制向量为

$$\xi = \frac{U_0^2}{x_r} \times \frac{s_{cr} - s_0^2/s_{cr}}{[s_{cr} - s_0^2/s_{cr}]^2} \quad (7)$$

由于 $s_0$ 远小于 $s_{cr}$ ,则式(7)简化为

$$\xi \approx U_0^2 / (x_r \times s_{cr}) = U_0^2 / R_r$$

## 2 基于粒子群算法的稳健负荷模型辨识

在电力系统负荷模型参数辨识中,辨识参数的选取对负荷模型控制性能有较大的影响,往往需要用离线仿真计算来确定,而粒子群算法是一种适合于解决大规模组合优化问题的全局优化算法<sup>[19]</sup>。将粒子群算法应用到负荷模型计算的前提条件是建立初始函数值  $\alpha = [R_s, x_s, x_r, x_m, R_r, A, B, k_{p_z}, k_{p_i}, k_{Q_z}, k_{Q_i}]$  搜索与测量值  $P_m(k)$  和  $Q_m(k)$  最接近的  $P(k)$  和  $Q(k)$  估计值,辨识准则为

$$\Delta J = \min \frac{1}{K \times L} \sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \xi(l) \times \{ [P(k) - P_m(k)]^2 + [Q(k) - Q_m(k)]^2 \}} \quad (8)$$

式中:  $K$  为数据长度;  $L$  为负荷节点个数。由于粒子群算法是通过用搜索空间中的粒子来确定函数的最优解,所有的粒子对象都有一个由优化函数决定的适应值和决定它们飞行方向的速度组成。粒子群算法的操作行为为

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + \text{Random}(0, c_1) (p_{id}^k - x_{id}^k) \\ \quad + \text{Random}(0, c_2) (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \\ v_{dmin} \leq v_{id}^k \leq v_{dmax} \\ x_{dmax} \leq x_{id}^k \leq x_{dmin} \end{cases} \quad (9)$$

假设在  $D$  维的搜索空间中,其群落是由  $m$  个微粒组成,其中第  $i$  个微粒的位置可以表示为一个  $D$  维的向量  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $x_i$  就是所求问题的一个潜在解。将  $x_i$  带入一个目标函数就可以计算出其适应值,并根据适应值的大小来衡量  $x_i$  的优劣。第  $i$  个微粒的“飞行”速度也是一个  $D$  维向量,记为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。记第  $i$  个微粒迄今为止搜索到的最优位置为  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ , 整个微粒群迄今为止搜索到的最优位置为  $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ , 其中,  $d = 1, 2, \dots, D$ ;  $w$  是惯性因子;  $c_1, c_2$  是学习因子;  $\text{Random}$  是随机函数;  $k$  是迭代次数; 其中  $P_{id}$  为单一微粒取得最小  $\Delta J$  时的  $x_{id}$ ;  $P_{gd}$  为所有微粒取得最小  $\Delta J$  时的  $x_{id}$ ;  $v$  为功率变化量矢量;  $x$  为功率矢量。因此基于粒子群算法的稳健负荷模型辨识步骤为:

1) 设置粒子种群人口、粒子位置和初始速度值;

2) 判断负荷模型参数的初始解的有效性并进行电网结构识别,并根据式(8)计算初始适应值指标;

3) 依据初始解确定粒子的当前位置、个体最优值和全局最优值的初始值;

4) 整理电网的结构,以负荷节点为核心,根据式(7)实现对预测负荷节点进行控制量计算;

5) 依据粒子群算法进化公式(9)进行进化计算;

6) 判断进化计算解的有效性,同时计算对应的负荷控制量合成最终指标;

7) 依据适应值指标更新粒子当前位置、个体最优解和全局最优解;

8) 计算每个粒子适应值的变化量,并判断迭代次数是否满足要求;如果已经达到设定迭代次数,则停止迭代计算;否则,转至步骤4)继续进行迭代计算,直到计算次数满足为止。

## 3 仿真计算

采用图 2 所示的 EPRI-36 节点系统图作为仿真电网,假设母线 BUS21 上的负荷由 50% 感应电动机和 50% 静态负荷组成,其中静态负荷是由 30% 的恒阻抗负荷、30% 的恒电流负荷和 40% 恒功率负荷构成。在系统中设置线路的单相或三相短路接地故障,得到故障母线 BUS21 的感应电动机的故障电压、故障有功功率和无功功率作为 PMU 测量值。

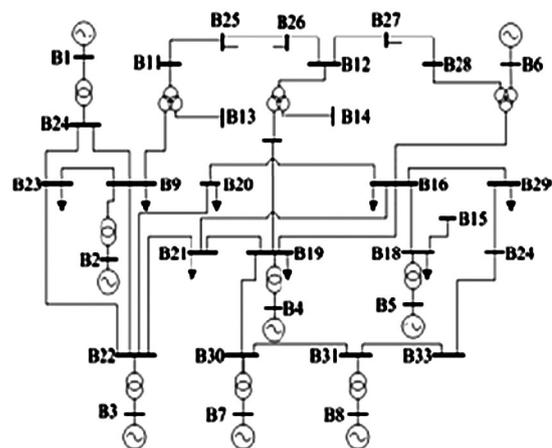


图 2 EPRI-36 节点系统图

0.2 s 时在 BUS20 与 BUS16 间发生 100% 的单相接地短路故障,并在 0.4 s 时故障切除,电压降深度为 27%。在 1 s 时 BUS20 与 BUS16 间发生 10%

的三相接地短路,并在 1.2 s 时故障切除,电压降深度为 70%。按照 BUS23、BUS20、BUS16、BUS29、BUS21、BUS19、BUS15 对电网负荷节点编号  $\xi(1)$ ... $\xi(7)$ 。表 1 为电网中负荷节点的控制量。

表 1 电网负荷节点的控制量

负荷节点 编号	电压降深度/(p. u.)	
	27%	70%
1	0.085 -j0.095	0.120 -j0.048
2	0.081 -j0.075	0.118 -j0.035
3	0.075 -j0.071	0.114 -j0.027
4	0.071 -j0.065	0.111 -j0.025
5	1	1
6	0.066 -j0.059	0.109 -j0.023
7	0.061 +j0.055	0.106 +j0.019

改进的稳健负荷模型采用表 1 中的数据进行负荷控制量补偿。改进的稳健负荷模型与综合负荷模型 TVAM 分别对 BUS21 上的负荷进行参数辨识,辨识结果如表 2 所示,仿真结果如图 3 和图 4 所示。

表 2 稳态负荷模型和综合负荷模型参数比较

电压降 深度 /(p. u.)	模型 参数	改进模型 参数辨识	TVAM 模型参数 辨识	实际 测量值
27%	$R_s$	0.233 4	0.251 2	0.23
	$x_s$	0.201 4	0.192 3	0.21
	$x_r$	0.122 4	0.122 5	0.12
	$x_m$	2.317 6	2.514 8	2.29
	$R_r$	0.069 7	0.082 5	0.07
	$A$	0.437 2	0.598 4	0.42
	$B$	0.215 9	0.341 8	0.21
	$k_{P1}$	0.218 5	0.159 8	0.30
	$k_{P2}$	0.479 5	0.632 1	0.30
	$k_{Qz}$	0.567 3	0.784 1	0.30
	$k_{Qi}$	0.476 2	0.487 4	0.30
	$R_s$	0.488 5	0.483 6	0.49
	$x_s$	0.203 7	0.246 0	0.22
	$x_r$	0.567 1	0.390 4	0.32
$x_m$	3.323 1	3.979 0	3.18	
$R_r$	0.279 2	0.132 7	0.29	
70%	$A$	0.989 5	0.924 4	1.00
	$B$	-0.010 2	0.005 7	0.00
	$k_{P1}$	0.428 1	0.385 4	0.30
	$k_{P2}$	0.246 7	0.392 7	0.30
	$k_{Qz}$	0.463 2	0.594 3	0.30
	$k_{Qi}$	0.414 38	0.457 1	0.30

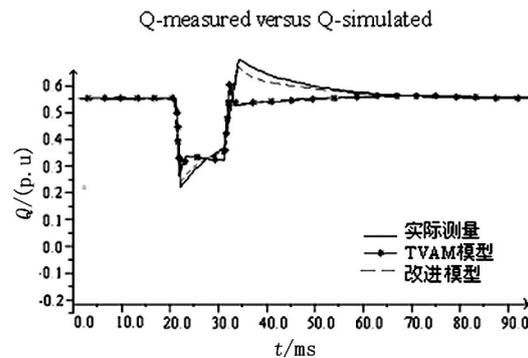
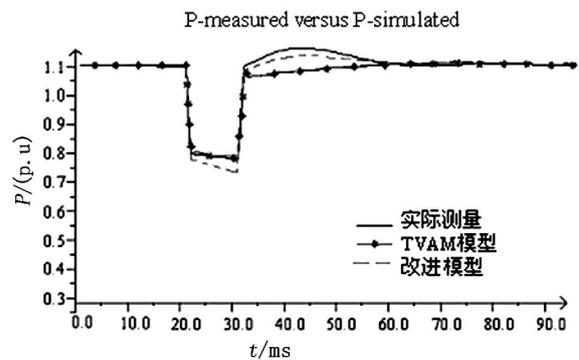
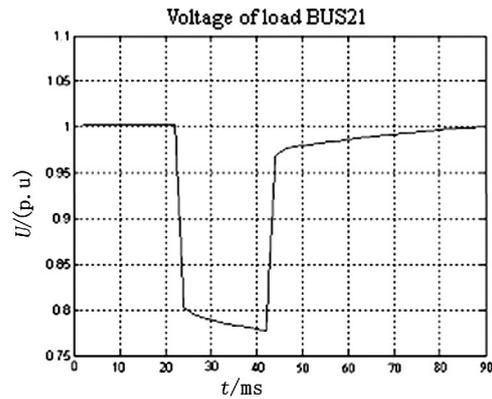


图 3 电压扰动 27% 的 BUS21 负荷有功无功值

从表 2 中可见,采用粒子群算法与协调控制相结合的负荷模型参数辨识比 TVAM 模型参数辨识更接近真实值。从图 3 和图 4 的负荷参数拟合曲线对比,可见改进负荷模型通过增加负荷控制策略,负荷模型的稳定性得到提高。

采用均方根(root mean square, RMS)式(10)计算误差,表 3 为模型输出误差的百分比。表 3 也说明了改进模型的动态特性相比于 TVAM 模型有明显的改善。

$$\begin{cases} \varepsilon_p = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n [P_m(k) - P(k)]^2} \\ \varepsilon_Q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n [Q_m(k) - Q(k)]^2} \end{cases} \quad (10)$$

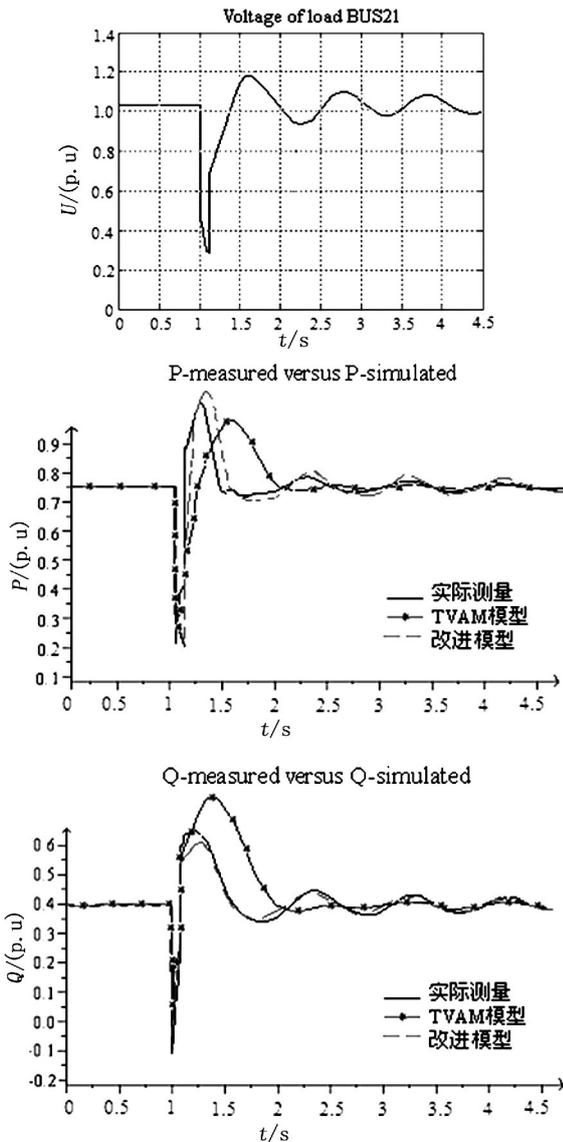


图 4 电压扰动 70% 的 BUS21 负荷有功无功值

表 3 模型输出误差的百分比

电压降深度 $l$ (p. u.)	功率	功率误差 / %	
		改进模型	TVAM 模型
27%	有功功率 $P$	0.63	0.87
	无功功率 $Q$	1.04	1.27
70%	有功功率 $P$	1.07	1.14
	无功功率 $Q$	1.13	1.62

## 4 结 论

基于粒子群算法与协调控制相结合的方法,分析了在电压扰动下的稳健负荷模型参数辨识过程,并根据负荷节点的电压变化情况,通过粒子群优化对含负荷控制的目标函数进行校正,使得模型参数在辨识迭代过程中获得全局最优值,达到负荷模型

的最佳稳定性。

1) 通过粒子群算法与分散协调控制相结合,降低了负荷模型的不稳定性,并加速了粒子群算法的收敛速度,在一定程度上缩短了负荷模型参数辨识的计算时间。

2) 通过粒子群优化对含感应电动机负荷模型的控制目标函数进行参数辨识校正计算,实现了负荷模型计算与电网系统融合,有效降低了系统负荷预测的复杂度。

## 参考文献

- [1] Price W. W. , Wirgau K. A , Murdoch A. Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies [J]. IEEE Trans. On Power Systems , 1988 , 3( 1 ) : 180 - 187.
- [2] 王钢 , 陶家琪 , 徐兴伟 , 等. 东北电网 500 kV 人工三相接地短路试验总结 [J]. 电网技术 2007 , 31( 4 ) : 42 - 48.
- [3] Kosterev D. N. , Taylor C. W. , Mittelstadt W. A. Model Validation for the August 10 , 1996 WSCC System Outage [J]. IEEE Trans. on Power Systems , 1999 , 14( 3 ) : 967 - 979.
- [4] Pereira L. , Kosterev D. , Mackin P. An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC [J]. IEEE Trans. on Power Systems , 2002 , 17( 4 ) : 1108 - 1115.
- [5] Ren - Feng Yuan , Qian Ai , Xing He. Research on Dynamic Load Modeling Based on Power Quality Monitoring System [J]. IET Generation , Transmission & Distribution , 2013 , 7( 1 ) : 46 - 51
- [6] Wang J. C. , Jiang H. D. , Chang C. L. , et al. Development of A Frequency - dependent Composite Load Model Using the Measurement Approach [J]. IEEE Trans. on Power Systems , 1994 , 9( 3 ) : 1546 - 1556.
- [7] Ma J. , Han D. , He R. M. Reducing Identified Parameter of Measurement - based Composite Load Mode [J]. IEEE Trans. on Power Systems , 2008 , 23( 1 ) : 76 - 83.
- [8] 李颖 , 贺仁睦 , 徐衍会. 广东电网基于 PMU 的负荷模型参数辨识研究 [J]. 南方电网技术 2009 , 3( 1 ) : 16 - 19.
- [9] 袁越 , 钱科军. 分布式发电规划的负荷模型研究 [J]. 电力科学与技术学报 2009 , 24( 1 ) : 2 - 7.
- [10] 王志群 , 朱守真 , 周双喜 , 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响 [J]. 电力系统自动化 2004 , 28( 16 ) : 56 - 60.

( 下转第 11 页 )

参考文献

- [1] 王淑娟, 郭元. 我国大规模发展风电的机制设计[J]. 太阳能学报, 2001, 22(1): 59-63.
- [2] Denny E. Wind Generation, Power System Operation, and Emissions Reduction [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2006, 21(1): 341-347.
- [3] 王睿, 张粒子, 张丽娟, 等. 含风电场系统风电与抽水蓄能匹配容量研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(6): 1039-1043.
- [4] J. Wang, A. Botterud, R. Bessa. Wind Power Forecasting Uncertainty and Unit Commitment [J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 4014-4023.
- [5] K. Methaprayoon, W. J. Lee. An Integration of ANN Wind Power Estimation into UC Considering the Forecasting Uncertainty [C]. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2005.
- [6] 孙元章, 吴俊, 李国杰, 等. 基于风速测量和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
- [7] 施建华, 谭素梅. 节能发电调度发电计划编制算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 48-51.
- [8] 董晓天, 严正, 冯冬涵, 等. 计及风电出力惩罚成本的电力系统经济调度[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 76-80.
- [9] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- [10] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
- [11] 邱威, 张建华, 刘念. 含大型风电场的环境经济调度模型和解法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 8-16.
- [12] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- [13] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 风电对电力系统运行的价值分析[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 10-14.
- [14] Stiebler M. 风力发电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 10-17.
- [15] Wood Allen J, Wollenberg Bruce F. Power Generation, Operation and Control [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [16] S. N. Omkar, G. Narayana Naik. Quantum Behaved Particle Swarm Optimization for Multi-objective Design Optimization of Composite Structures [J]. Expert System with Application, 2009, 36(8): 11312-11322.
- [17] Yejie Cai, Jun Sun. Optimizing the Codon Usage of Synthetic Gene with QPSO Algorithm [J]. Journal of Theoretical Biology, 2008, 254(1): 123-127.

作者简介:

张里(1984), 博士研究生, 从事风力发电方面研究。  
(收稿日期: 2015-11-02)

(上接第5页)

- [11] 相里碧玉, 蔡金锭, 孙轶群. 计及分布式发电的配电网快速潮流算法[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 62-66.
- [12] Jianwei Liu, Salama M. M. A, Mansour R. R. An Efficient Power Flow Algorithm for Distribution Systems with Polynomial Load [J]. International Journal of Electrical Engineering Education, 2002, 39(4): 371-386.
- [13] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.
- [14] Umanand L., Bhat S. R. Online Estimation of Stator Resistance of An Induction Motor for Speed Control Applications [J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1995, 142(2): 97-103.
- [15] Andria G., Dell'Aquila A., Salvatore L., et al. Improvement in Modeling and Testing of Induction Motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, 2(2): 285-293.
- [16] Jin M., Renmu H., Hill D. J. Load Modeling by Finding Support Vectors of Load Data From Field Measurements [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(2): 726-735.
- [17] 邢颖, 李宝树, 程佳. 异步电动机起动过程的电压暂降分析[J]. 电气应用, 2008, 27(15): 79-83.
- [18] 宋云亭, 郭永基, 张瑞华. 基于电磁暂态仿真的电压骤降概率评估[J]. 清华大学学报(自然科学报版), 2003, 43(9): 1177-1180.
- [19] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.

(收稿日期: 2015-10-15)