

负荷中心含微电网的小干扰电压稳定性分析

杨浩¹, 牛强¹, 吴迎霞², 罗建¹, 张磊¹, 江宇飞²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆市电力公司调度通信中心, 重庆 400014)

摘要: 分析负荷断面的小干扰电压稳定时, 当负荷中心包含地方电厂, 这些负荷中心电源的动态特性对受端电网的电压稳定有着显著的影响。使用包含小电源的负荷模型, 运用基于潮流的小干扰稳定分析法, 研究小电源为汽轮发电机时其对负荷断面电压稳定的影响, 利用模态分析法获得评价电压稳定的指标, 并深入探讨了机组的励磁和调速系统的增益环节与电压稳定指标的关系。结果表明负荷中心的汽轮发电机组对电压稳定有着积极作用, 仿真结果验证了该结论的正确性。

关键词: 综合负荷模型; 微电网; 小干扰电压稳定; 雅可比矩阵; 模态分析法

Analysis of small disturbance voltage stability of the load center with microgrid

YANG Hao¹, NIU Qiang¹, WU Ying-xia², LUO Jian¹, ZHANG Lei¹, JIANG Yu-fei²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Electric Power Dispatching and Communication Center, Chongqing 400014, China)

Abstract: When analyzing cross-section of a load of small disturbance voltage stability, it is found that if local power plant is in load center, the small power has a significant impact on voltage stability of receiver grid. This paper uses the load model containing small power and the analysis method of small disturbance based on power flow to study the influence of local power that is taken as the turbo-generator unit on voltage stability of load cross-section. The modal analysis method is used to obtain voltage stability index and to deeply discuss how the amplification factors of the excitation system and speed control system of the unit affect the voltage stability index. Results show that the synchronous generator in load center has a positive effect on voltage stability. Simulation results indicate the validity of the conclusions.

Key words: synthesis load model; microgrid; small disturbance voltage stability; Jacobian matrix; modal analysis method

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0038-06

0 引言

近些年来, 在世界范围内发生了多起与电压失稳有关的大面积停电事故^[1-2], 造成了巨大的经济损失, 这引起人们对电力系统电压稳定的高度重视与深入的研究。对于大量功率通过长距离输电线路输送到负荷中心的电力系统, 其受端负荷母线往往容易发生电压失稳, 并且负荷母线的电压行为与负荷的动态特性密切相关^[3]。

目前, 我国电力系统受端电网中存在大量的小火电、燃机电厂, 小水电, 自备电厂, 风电, 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源^[4]等, 它们距离负荷中心很近, 发出的电能不经远距离传输就

直接送入生产生活区。运行方式采用机组直接与负荷母线联网运行或组成微电网再通过联络线与负荷母线联网运行。不同的微电网机组类型对电压稳定有着不同的影响。

本文主要研究负荷中心含有汽轮发电机组或燃气轮机并网后受端节点电压稳定问题, 这类机组发电方式灵活^[5], 可以快速地响应负荷的变化。实际潮流计算与稳定分析, 有时将其与负荷一起考虑, 机组的加入改变了负荷的动态特性。在负荷中心电源作用下, 输送相同的功率可以提高电压稳定的安全裕度, 避免在电力调度中过于保守, 或者通过合理的利用负荷中心电源改善受端电网的电压稳定性。最后使用模态分析法获得小干扰电压稳定指标, 以利于运行人员做出实时判断。

基金项目: 国家‘111’计划资助项目 (B08036)

1 系统的电路模型

1.1 综合负荷模型的结构

为了得到更加精确的负荷模型,考虑到配电网网络阻抗和无功补偿以及方便的模拟小电源,中国电力科学研究院提出了综合负荷模型(SLM)。综合负荷模型的等值电路参见文献[6]。小电源存在于负荷当中,可以使用该模型方便地模拟。

1.2 系统的等值电路与微分代数方程组(DAE)

由 WAMS 在线测量负荷节点的电流相量、电压相量、有功和无功功率,这时可以求得电力系统在任一时间断面上,从某个负荷母线向系统侧看进去部分的戴维南等值电路:等值电势为 \dot{E}_{eq} ,等值阻抗为 $R_{eq}+jX_{eq}$ 。负荷母线下 R_D+jX_D 是配网阻抗,负荷中心小电源所发出的电能就地送入生产区,输电线路与电网数百公里的传输至负荷中心的线路相比阻抗很小,忽略不计,系统如图 1 所示。

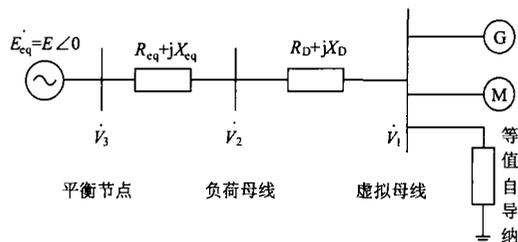


图 1 系统等值电路图

Fig.1 System equivalent circuit

静态负荷采用恒阻抗模型,其与无功电容补偿合并在一起成为虚拟母线上的自导纳。因使用感应电动机三阶模型和一阶模型在研究小干扰稳定时得到的电压稳定结论是一致的^[7],故本文采用一阶模型,其转子运动方程可以表示为:

$$\dot{s} = \frac{1}{M} [T_{Lm} - T_{Le}(V_1, s)] \quad (1)$$

式中, s 、 M 、 T_{Lm} 、 T_{Le} 及 V_1 分别为电动机的转差、惯性常数、机械转矩、电磁转矩和所在的节点电压。电磁转矩 T_{Le} 可以根据电动机的稳态等值电路求出,机械负载转矩的 T_{Lm} 表达式为:

$$T_{Lm} = K_L [\alpha + (1 - \alpha)(1 - s)^m] \quad (2)$$

等值发电机采用经典模型^[8]:

$$\dot{\delta} = \omega - 1 \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = \frac{-D\omega + T_{Gm} - T_{Ge}}{T_J} \quad (4)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{E_{fq} - E'_q - (X_d - X'_d)I_d}{T'_{do}} \quad (5)$$

$$T_{Ge} = E'_q I_q - (X'_d - X_q) I_d I_q \quad (6)$$

励磁系统与汽轮机调速系统设为简单的一阶惯性环节,如下:

$$\dot{E}_{fq} = \frac{K_E (V_{ref} - V_1) - E_{fq}}{T_E} \quad (7)$$

$$\dot{T}_{Gm} = \frac{K_T (\omega_{ref} - \omega) - T_{Gm}}{T_T} \quad (8)$$

如果忽略其定子电阻,则 T_{Ge} 与发电机输出功率相等,即 $T_{Ge} = P_G$ 。由定子电压平衡方程及向量关系,电压、电流的 d 、 q 分量及输出功率表示为:

$$\begin{cases} V_{d1} = V_1 \sin(\delta - \theta_1) \\ V_{q1} = V_1 \cos(\delta - \theta_1) \end{cases} \quad (9)$$

$$I_d = \frac{E'_q - V_1 \cos(\delta - \theta_1)}{X'_d} \quad (10)$$

$$I_q = \frac{V_1 \sin(\delta - \theta_1)}{X_q} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_G = \frac{E'_q V_1 \sin(\delta - \theta_1)}{X'_d} - \frac{1}{2} V_1^2 \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2(\delta - \theta_1) \\ Q_G = \frac{E'_q V_1 \cos(\delta - \theta_1)}{X'_d} - \frac{1}{2} V_1^2 \left[\left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_q} \right) \cos 2(\delta - \theta_1) + \frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q} \right] \end{cases} \quad (12)$$

网络方程:全系统共有 3 个节点,其中 1 为虚拟节点,2 为负荷节点,3 设为平衡节点。为简单起见,将在计算中不需参与的节点 2 取消,虚拟节点 1 与平衡节点 3 视为直连,节点 1 的功率平衡方程为如式 (13)。

$$\begin{cases} P_G - P_L(V_1, s) - f_{p1}(V_1, \theta_1) = 0 \\ Q_G - Q_L(V_1, s) - f_{q1}(V_1, \theta_1) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: V 、 θ 分别为由各节点电压及其相位所组成的向量; f_{p1} 和 f_{q1} 表示由网络决定的注入节点 1 有功和无功功率。

2 小干扰电压稳定分析

将各发电机,电动机微分方程式及网络方程式进行线性化后:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_G \\ \Delta \dot{x}_L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_G & 0 & B_G \\ 0 & A_L & B_L \\ C_G & C_L & J'_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_G \\ \Delta x_L \\ \Delta y_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式 (14) 可表示为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = J_{fx} \Delta x + J_{fy} \Delta y \\ 0 = J_{gx} \Delta x + J_{gy} \Delta y \end{cases} \quad (15)$$

当 J_{fx} 非奇异时, 可得动态化的潮流雅可比矩阵:

$$J_{dyn} = J_{gy} - J_{gx} J_{fx}^{-1} J_{fy} \quad (16)$$

根据文献[9]中定理: 对于实际电力系统, 不考虑个别动态元件的失稳时, 存在动态化的潮流雅可比矩阵 J_{dyn} , 并且 J_{dyn} 和式(14)系数矩阵同奇异。

小电源送出功率为 $P_{G0}=0.4$, 以系统容量为基准容量。发电机的参数^[10]如表1 (时间常数单位为s, 其他均为自身容量下的标么值)。

表1 同步发电机模型参数

Tab.1 Parameters of synchronous generator model

X_q	X_d	X'_d	T'_{do}	T_J	T_E	T_T	D
1.035 4	0.72	0.36	10.9 s	8.75 s	0.03 s	0.1 s	6

为便于分析, 设小电源初始运行状态点位于: $E'_{q0} = 2.00$, $\delta_0 - \theta_1 = 45^\circ$, 励磁系统增益 $K_E=200$, 调速系统增益 $K_T=50$ 。负荷模型采用 65%感应电动机+35%恒阻抗模型, 感应电动机模型采用典型参数见表 2。

表 2 感应电动机模型参数

Tab.2 Parameters of induction motor model

R_s	X_s	R_r	X_r	X_m	M	α	m	s_0
0	0.295	0.02	0.12	3.5	2	0.15	2	0.011 6

假定测得系统外部的戴维南电路等值电势为 $\dot{E}_{eq} = 1.10 \angle 0$, 线路等值阻抗为 $R_{eq} + jX_{eq} = j0.1000$, 配电网等值阻抗为 $R_D + jX_D = j0.0245$, 在保持母线1功率因数 $\cos \phi = 0.95$ 不变, 不断增加负荷有功功率, 求得虚拟负荷母线的P/V曲线如文献[7]中图2所示。其静态传输功率极限在曲线的鼻点处: $P_{max}=3.517$ 。

实际应用中, 小电源如果是单发电机系统, 可以方便地使用其参数, 而对于多机系统则需要用等值, 参数辨识^[11-12]或其他方法获得相应的参数。配网的阻抗、感应电动机的比例和参数也可以采取参数辨识^[13]的策略获得。

将系统DEA模型在给定的某个平衡点(P,V)处线性化, 并通过初始化计算求得式(14)的系数矩阵。进而求得 J_{dyn} , 它是一个 2×2 阶矩阵。对于此系统只需要判别矩阵 J_{dyn} 所有特征值实部的符号, 根据

实际情况, 当出现一个特征值的实部为零, 其余特征值均有负实部时, 即认为系统处于临界稳定边缘, 实际运行中应该避免这种不可靠的情况。

由表3可以看出, 在保持线路向负荷中心输入功率与负荷母线上功率因数保持不变的情况下, 地方电源的加入使 λ_1 距离虚轴的距离有所减小, 但变化不大。而在无地方电源时原本距离虚轴较近的 λ_2 , 在地方电源并网运行后远离了虚轴。在静态功率传输鼻点处, 矩阵的两个特征值依然为负数, 说明它不是小干扰电压稳定的极限点^[7]。

表3 小电源对动态化的潮流雅可比矩阵特征值的影响

Tab.3 The influence of small power on eigenvalues of the dynamic Jacobian matrix

P (0)	平衡点 V (0)	无地方电源		有地方电源	
		λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
2.000	0.987 9	-9.122 8	-6.738 8	-8.483 3	-47.980 2
3.000	0.872 6	-8.037 1	-4.964 9	-7.056 7	-46.731 7
3.500	0.717 7	-7.040 6	-2.639 7	-5.207 3	-45.222 2
3.517	0.688 1	-6.777 3	-2.270 6	-4.874 3	-44.952 4
3.500	0.639 1	-6.333 1	-1.690 5	-4.401 6	-42.748 5
3.089	0.427 6	-4.764 2	-0.001 5	-2.719 0	-41.976 7
3.088	0.427 3	-4.762 0	0.001 3	-2.715 8	-41.976 6
2.500	0.348 5	-3.556 1	0.974 4	-1.729 4	-41.802 9

注: $K_T=50$, $K_E=200$

为获得表征电压稳定的指标, 本文利用模态分析确定系统关键节点与区域的方法并根据本文动态化雅可比矩阵的特点来求得该指标。当求得 J_{dyn} 也就是获得了系统、发电机与负荷动态化的雅可比矩阵, 功率式的修正方程式相应变为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J_{dyn} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{s11} & J_{s12} \\ J_{s21} & J_{s22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (17)$$

若令 $\Delta P=0$, 则可得系统负荷无功功率与节点电压的增量关系为

$$\Delta Q = J_R \Delta V = (J_{s22} - J_{s21} J_{s11}^{-1} J_{s12}) \Delta V \quad (18)$$

这里 J_R 为 1×1 矩阵, 特征值 Λ 为其本身值, 左右特征向量均为 [1]。所以, $\Lambda \Delta V = \Delta Q$ 可理解为模态无功对模态电压的灵敏度, 当 Λ 很小或接近于零, 则表明模态无功的微小变化会导致模态电压的急剧变化, 也就是系统接近于不稳定。因而, 可以认为电压崩溃实际上对应于模态电压崩溃。为符合习惯, 小干扰电压稳定指标可取:

$$I_s = -\Lambda \quad (19)$$

表 4 中无地方电源一阶模型 λ 为文献[7]中值, 无地方电源模态法与一阶模型法有相同的失稳点。

当有地方电源参与运行时,小干扰稳定电压稳定指标得到提高。

以母线上负荷增长率为横坐标,小干扰电压稳定指标 I_s 为纵坐标,其呈较好的线性关系。放大倍

数的选择与无功储备的容量有关,本文励磁环节采用较高的放大倍数。虚拟母线虽不真实存在,但位于线路的末端,虚拟母线上的电压稳定,则真实母线上的电压必然稳定。

表4 动态化潮流雅可比矩阵的模态特征值

Tab.4 The model eigenvalues of the dynamic Jacobian matrix

平衡点	1	2	3	4	5	6	7	8
无地方电源一阶模型 λ	-14.495 4	-8.353 6	-3.184 2	-2.166 5	-1.632 9	-4.824 6 $\times 10^{-4}$	7.419 0 $\times 10^{-4}$	0.289 0
无地方电源模态法 Λ	-7.235 8	-5.618 5	-3.514 7	-3.103 1	-2.416 1	-25.493 2 $\times 10^{-4}$	22.370 5 $\times 10^{-4}$	1.927 2
有地方电源模态法 Λ	-47.907 3	-46.433 2	-44.534 6	-44.184 4	-42.463	-40.619 1	-40.617 1	-40.210

注: $K_T=50, K_E=200$

3 调节系统对电压稳定指标的影响

为合理利用负荷中心的小机组,选择适当的调节系统参数,以下讨论机组控制系统部分参数对电压稳定的影响。

表5 电压调节器放大系数对电压稳定指标的影响

Tab.5 The influence of voltage regulator's amplification factor on voltage stability index

平衡点	$K_E=180$	$K_E=200$	$K_E=220$	$K_E=240$
	I_s	I_s	I_s	I_s
1	43.858 6	47.907 3	51.955 9	56.004 6
2	42.376 5	46.433 1	50.489 8	54.546 5
3	40.460 8	44.534 6	48.608 5	52.682 3
4	40.106 0	44.184 4	48.215 2	52.341 3
5	38.541 1	42.463 5	46.412 9	50.308 3
6	36.600 5	40.619 1	44.637 6	48.656 1
7	36.598 4	40.617 1	44.635 9	48.654 6
8	36.064 3	40.210 0	44.355 7	48.501 4

注: $K_T=50$

由表5可看出发电机的励磁系统增益系数对小干扰电压稳定影响显著,使稳定指标得到提高。

表6 功率调节器放大系数对电压稳定指标的影响

Tab.6 The influence of power regulator's amplification factor on voltage stability index

平衡点	$K_T=30$	$K_T=50$	$K_T=70$	$K_T=90$
	I_s	I_s	I_s	I_s
1	47.907 3	47.907 3	47.907 3	47.907 3
2	46.433 1	46.433 1	46.433 1	46.433 1
3	44.534 6	44.534 6	44.534 6	44.534 6
4	44.184 4	44.184 4	44.184 4	44.184 4
5	42.463 5	42.463 5	42.463 5	42.463 5
6	40.619 1	40.619 1	40.619 1	40.619 1
7	40.617 1	40.617 1	40.617 1	40.617 1
8	40.210 0	40.210 0	40.210 0	40.210 0

注: $K_E=200$

由表6可看出发电机的调速系统增益系数对小干扰电压稳定基本没有影响,以上是在各平衡点输入功率不变的情况下讨论的。

4 算例分析

本文采用EPRI 36节点系统作为算例,利用中国电科院PSASP程序进行分析,以验证负荷中心电源对电压稳定的影响。EPRI36节点系统图见PSASP用户手册。该系统共有9个负荷节点,所有负荷节点均计及感应电动机负荷,发电机节点1为平衡节点,系统基准容量为100 MVA。此处,将母线5上的电源作为负荷中心的小电源,研究其对母线18电压的影响。全网负荷按初始功率值成比例增加,增加的负荷有功由平衡节点供给。

图2中电压稳定指标曲线0为地方电厂未参与运行,曲线1为地方电厂投入运行与改变调速系统的增益系数。曲线1的变化表明地方电厂的投运提高了母线的电压稳定,当仅改变调速系统的增益系数对提高电压稳定没作用。曲线2至6为地方电厂励磁系统的增益系数依次增加,可以看出电压稳定指标随着励磁放大系数的提高而提高。高励磁放大增益可以获得较好的电压指标,但需要较大的无功储备,否则在受到扰动时依然无法对系统提供足够的支持。此外,该指标在临近失稳点处线性度有所变差。

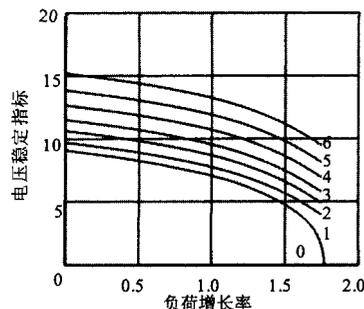


图2 负荷节点的小干扰电压稳定指标

Fig.2 Small disturbance voltage stability index of load bus

图3为EPRI 36节点系统在地方电厂不同的输出功率时其对P/V曲线的影响,图4为某实际电力系统重负荷区,在地方电厂并网后不同功率输出时P/V曲线的变化。

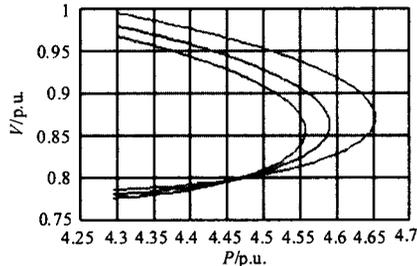


图3 小电源对P/V曲线的影响

Fig.3 Influence of small power on the P/V curves

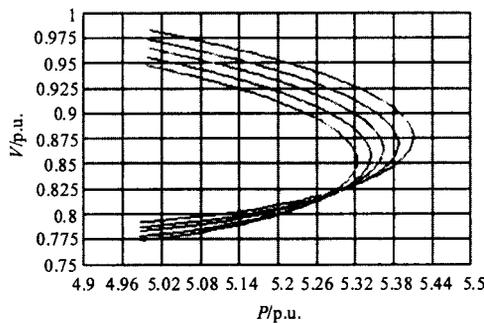


图4 地方电厂对P/V曲线的影响

Fig.4 Influence of local power plant on the P/V curves

图3与图4中曲线从左向右,地方电厂的输出功率依次增大。仿真结果可以看出,负荷中心电源的增加,P/V曲线向右移动。从负荷消耗相同的功率角度来看,母线可以维持更高的电压水平;从维持相同的母线电压角度来看,负荷可以安全地消耗更多的功率。

受端系统是整个电力系统的重要组成部分,应作为实现合理的电网结构的一个关键环节予以加强^[14],合理的运行方式可以提高受端电网的稳定性,当线路处于轻载时,减小负荷区域发电机的有功功率可能是有利的,这样可以使这些发电机提供更多的无功功率,同时起到更好的备用,而有功功率由远方经济性更好的机组承担。当线路处于重载时,为减少有功功率的输入,负荷区发电机的投入运行可以使平衡点上移,同样可以使稳定裕度增加,此时,经济性则在其次地位。

5 结论

汽轮发电机组的励磁系统增益环节对小干扰电压稳定的影响积极而又显著,发电负荷对电压稳定有间接的影响,而调速系统增益环节则没有直接的

影响。目前,国外的一些电力公司,例如日本东京电力公司,为提高电网的电压稳定性,根据自身电网的实际情况,对负荷中心的一些发电机组采取脱轴处理,将其变为调相机运行,使电网的电压稳定有较高的安全水平。同理,我国也可根据自身的网络特点合理的组织与利用负荷中心的小电源,在不增加投资的情况下提高输电的电压稳定性。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.
XUE Yu-sheng. The way from a simple contingency to system wide disaster: lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [2] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-4.
GAN De-qiang, HU Jiang-yi, HAN Zhen-xiang. Thinking over several blackouts in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4.
- [3] PAL M K. Voltage stability: analysis needs, modeling requirement and modeling adequacy[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(3): 279-286.
- [4] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变器电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 91-93.
DING Ming, YANG Xiang-zhen, SU Jian-hui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 91-93.
- [5] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响[J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.
QIAN Ke-jun, YUAN Yue. Distributed generation technology and its impact on power systems[J]. Relay, 2007, 35(13): 25-29.
- [6] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 2008: 78-82.
- [7] 林舜江, 李欣然, 刘杨华. 考虑负荷动态模型的在线小干扰电压稳定指标[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 25-28.
LIN Shun-jiang, LI Xin-ran, LIU Yang-hua. On-line small disturbance voltage stability index considering dynamic load model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 25-28.
- [8] 吴涛, 王伟胜, 王建全, 等. 用计及机组动态时的潮流雅可比阵计算电压稳定极限[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 13-16.
WU Tao, WANG Wei-sheng, WANG Jian-quan, et al.

- Calculation of voltage stability margin by load flow Jacobian matrices and taking account of generator unit dynamics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, 21 (4) : 13-16.
- [9] 张元鹏,周双喜,王利锋,等. 静态电压稳定性分析模型的理论基础[J]. *中国电机工程学报*, 1999, 19 (10) : 55-63.
ZHANG Yuan-peng, ZHOU Shuang-xi, WANG Li-feng, et al. The theoretical foundations of static voltage stability analysis model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19 (10) : 55-63.
- [10] 牟小松,成涛,林莉,等. 汽轮机系统对电力系统低频振荡的影响[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2006, 29 (2) : 54-56.
MU Xiao-song, CHENG Tao, LIN Li, et al. Influence of steam turbine system on low frequency oscillation[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, 29 (2) : 54-56.
- [11] 金字清,岳陈熙,甄威,等. 基于功角测量的同步发电机参数辨识频域法[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31 (4) : 7-10.
JIN Yu-qing, YUE Chen-xi, ZHEN Wei, et al. On-line frequency response method of synchronous machine parameter identification based on rotor angle measurement[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31 (4) : 7-10.
- [12] 米增强,陈志忠,南志远,等. 同步发电机动态参数辨识[J]. *中国电机工程学报*, 1998, 18 (2) : 100-105.
MI Zeng-qiang, CHENG Zhi-zhong, NAN Zhi-yuan, et al. Dynamic parameter identification of synchronous machines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1998, 18 (2) : 100-105.
- [13] 周海强,茆超,鞠平,等. 考虑配电网的综合负荷模型可辨识性分析[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32 (16) : 16-19.
ZHOU Hai-qiang, MAO Chao, JU Ping, et al. An identifiability analysis of a synthetic load model with the distribution network considered[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32 (16) : 16-19.
- [14] 夏向阳,张一斌,蔡灏. 电力受端系统的稳定问题及其对策分析[J]. *继电器*, 2005, 33 (17) : 74-78.
XIA Xiang-yang, ZHANG Yi-bin, CAI Hao. Problems and countermeasures of power receiver system stability[J]. *Relay*, 2005, 33 (17) : 74-78.

收稿日期: 2009-10-15; 修回日期: 2010-01-18

作者简介:

杨浩(1960-),男,副教授,从事电力系统信号处理、运行与控制的研究;

牛强(1980-),男,硕士研究生,从事电力系统运行与控制的研究; E-mail: 20071102147@cqu.edu.cn

吴迎霞(1977-),女,工程师,从事电力系统运行与控制的研究。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [4] 索南加乐,张恽宁,齐军,等. II模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26 (5) : 12-18.
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on II-model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26 (5) : 12-18.
- [5] 索南加乐,张恽宁,齐军,等. 基于时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39 (12) : 1370-1374.
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Current differential protection based on time-domain algorithm of capacitive current compensating[J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2005, 39 (12) : 1370-1374.
- [6] 吴通华,郑玉平,朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29 (12) : 61-66.
WU Tong-hua, ZHENG Yu-ping, ZHU Xiao-tong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29 (12) : 61-66.
- [7] 张琦兵,邵能灵,袁成,等. 同塔四回输电线的相模变换[J]. *中国电机工程学报*, 已录用.
ZHANG Qi-bing, TAI Neng-ling, YUAN Cheng, et al. Phase-mode transformation of four-parallel lines on the same tower[J]. *Proceedings of the CSEE*, accepted.
- [8] 宋国兵,李森,康小宁,等. 一种新相模变换矩阵. *电力系统自动化*, 2007, 31 (14) : 57-60.
SONG Guo-bing, LI Sen, KANG Xiao-ning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31 (14) : 57-60.

收稿日期: 2009-09-24; 修回日期: 2009-11-01

作者简介:

张琦兵(1985-),男,硕士研究生,主要从事电力系统保护与控制方向的研究; E-mail: zqb_312@163.com

邵能灵(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护、电力系统安全稳定控制及电力市场的教学和研究工作。