

基于支路能量函数的脆弱支路评估

黄昭蒙¹, 李华强¹, 杜涛², 林茂君¹

(1. 四川大学电气信息学院, 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川省电力公司南充电业局, 四川 南充 637000)

摘要: 电网的脆弱性问题, 作为电网安全问题的深入和扩展, 具有重大的研究价值。从能量函数的观点出发, 建立了完整的支路静态能量函数模型, 综合考虑了系统的多个物理量对能量信息的映射, 能够更加全面且准确地反映不同运行状态下的支路脆弱性。基于能量信息构建了脆弱灵敏度指标及脆弱度指标分别评估系统的支路脆弱性和脆弱程度, 并分析了系统负荷和线路结构发生变化时对脆弱灵敏度的影响, 确定了电网的关键脆弱支路。通过对 IEEE-30 母线系统的仿真, 验证了所提指标的可行性和有效性, 可望用于在线评估。

关键词: 电力系统脆弱性; 支路能量函数; 脆弱性评估; 脆弱支路; 关键脆弱支路

Vulnerable branch assessment based on branch energy function

HUANG Zhao-meng¹, LI Hua-qiang¹, DU Tao², LIN Mao-jun¹

(1. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Nanchong Electric Power Bureau, Sichuan Electric Power Company, Nanchong 637000, China)

Abstract: Power grid vulnerability, as the deepening and developing issue of network security, shows its great research significance. Based on the energy function theory, the branch static energy function model is constructed comprehensively. Multi physical quantity is mapped to the amount of branch energy. The branch vulnerability can be reflected more accurately under different operation state. And then, the vulnerable sensitivity index established in the form of energy is established to assess vulnerability and the branch vulnerability index is proposed to evaluate branch vulnerability degree. The vulnerable sensitivity with the system load and structure changing is analyzed to confirm the key vulnerable branch. At last, the simulations of this method in IEEE-30 bus system demonstrate its validity and feasibility. The proposed approach is promising to be applied in on line vulnerability assessment.

Key words: power system vulnerability; branch energy function; vulnerability assessment; vulnerable branch; key vulnerable branch

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2012)15-0007-05

0 引言

电网脆弱性是指扰动或者故障影响下电网传输能力不断弱化的特性^[1]。电网结构庞大而复杂, 影响系统脆弱性的因素有很多, 主要包括运行状态变化、通信设备故障、电力保护设备故障以及电网拓扑结构变化等。

从已有的国内外文献来看, 电网脆弱性分为状态脆弱性和结构脆弱性两个方面^[2-4]。这两方面的研究机理及方法大不相同。状态脆弱性是研究状态变量偏离正常状态或距离临界值的程度, 研究方法以裕度计算, 灵敏度分析及能量函数分析^[5]为主; 而结构脆弱性则是从网络拓扑的角度研究某一单元在网络结构中的“重要程度”, 即该单元退出后对电网

的影响程度, 研究方法以复杂网络理论和小世界网络理论为主。

文献[6]基于结构保持的多机电力系统拓扑暂态能量函数, 以支路势能为基础建立系统安全指标来评估系统脆弱性, 但其支路势能函数仅包括有功功率对应的部分。文献[7]利用灵敏度技术定义了电网脆弱域指标, 确定了电网的脆弱域和脆弱母线。文献[8]在概率论的基础上将风险理论应用于电力系统脆弱性评估, 建立了评估电力系统脆弱性的风险指标和相应的算法, 解决了传统的确定性安全评估方法无法满足电力市场以及复杂电力系统要求的问题。文献[9]基于蒙特卡罗概率方法, 设定了母线割断概率、负荷损失概率以及负荷削减期望等, 以此建立系统脆弱性指标分析系统的脆弱性。文献

[10-11]将电网等效为有向权重图,分析电网在随机攻击和蓄意攻击下的脆弱性。文献[12]构建了基于线路电抗的加权电网拓扑模型,提出了评估电网脆弱性的新方法。文献[13]提出基于P,Q网分解的电网有向加权拓扑模型,给出了两种拓扑模型下线路的方向选取与线路权重大小的计算方法,由此利用复杂网络理论对电网脆弱性进行分析。

本文基于静态能量函数^[14]的观点,从基本的支路功率传输等式出发,推导了完整的电网支路静态能量函数模型,将支路的有功功率和无功功率传输变化量共同映射到支路能量上,并基于能量信息建立了评估支路脆弱性的指标。通过对IEEE-30母线系统的仿真,证明了该方法的可行性和有效性。

1 支路静态能量函数模型

支路能量是支路传输功率的综合体现^[15]。由于支路传输的功率包括有功功率和无功功率,因此支路能量应由支路上传输的有功及无功功率对应的两个势能组成。

由图1所示的支路模型^[16],建立支路节点电压间的相互关系。

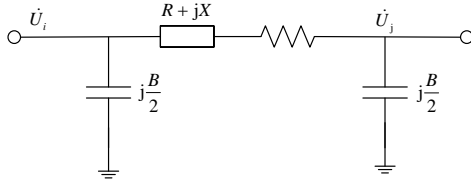


图1 网络支路等值电路

Fig. 1 Network branch equivalent circuit

根据图1所示模型,由节点*i*、节点*j*的电压关系得(忽略线路电阻)

$$U_j \approx U_i \cos \delta_{ij} - U_i \sin \delta_{ij} \tan \varphi_j \quad (1)$$

由式(1)可得支路节点*i*与节点*j*间的电压差 U_{ij} 为

$$U_{ij} = U_i (1 - \cos \delta_{ij} + \sin \delta_{ij} \tan \varphi_j) \quad (2)$$

式中: U_i 、 U_j 分别为节点*i*、*j*的电压幅值; δ_{ij} 为节点*i*、*j*的相位差; φ_j 为节点*j*的功率因数角。

根据支路功率传输关系,支路*ij*的潮流表达式为

$$P_{ij} = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = -U_i^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

式中: P_{ij} 是*ij*支路当前传输的有功功率; Q_{ij} 是*ij*支路当前传输的无功功率; B_{ij} 是*ij*支路的电纳; G_{ij}

是*ij*支路的电导。

由此可得支路功率传输的变化量为

$$f_{p_{ij}} = P_{ij} - P_{ij}^s = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij}^s \quad (5)$$

$$f_{q_{ij}} = \frac{Q_{ij} - Q_{ij}^s}{U_{ij}} = \frac{-U_i^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij}^s}{U_{ij}} \quad (6)$$

支路传输的有功功率主要由支路节点间的电压相角差决定,而无功功率主要取决于支路两节点间的电压幅值差。因此,本文建立了完整的同时包含有功及无功功率的支路能量函数模型,该模型同时对电压相角差和电压幅值差两部分进行积分^[17],表达式为

$$E_{ij} = \int_{(\delta_{ij}^s, U_{ij}^s)}^{(\delta_{ij}, U_{ij})} [f_{p_{ij}}, f_{q_{ij}}] d \begin{bmatrix} \delta_{ij} \\ U_{ij} \end{bmatrix} = \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} (P_{ij} - P_{ij}^s) d\delta_{ij} + \int_{U_{ij}^s}^{U_{ij}} \left(\frac{Q_{ij} - Q_{ij}^s}{U_{ij}} \right) dU_{ij} = \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} [U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij}^s] d\delta_{ij} + \int_{U_{ij}^s}^{U_{ij}} \left[\frac{-U_i^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij}^s}{U_{ij}} \right] dU_{ij} \quad (7)$$

将式(2)代入式(7),可得到支路静态能量函数值。式中 $U_{ij}^s, \delta_{ij}^s, P_{ij}^s, Q_{ij}^s$ 为 $U_{ij}, \delta_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}$ 的初始状态值。

基于基本的支路功率传输方程及静态能量函数的数学模型建立的表征支路能量的方程式(7),其物理意义在于:当系统运行方式从初始运行状态变化到当前运行状态时,支路的功率传输变化量在能量域的累积。

2 基于静态能量信息的脆弱性评估指标

2.1 脆弱趋势指标

根据系统脆弱性的定义,提出支路脆弱灵敏度表达式为

$$\rho_{ij} = \frac{dE_{ij}}{dU_{ij}} \quad (8)$$

式中, ρ_{ij} 为支路能量对支路节点电压差求导,因此

ρ_{ij} 能够表征支路能量随支路节点电压差的变化趋势。

随着支路传输任务的不断增加,系统各条支路均会呈现脆弱趋势,但各支路在脆弱趋势上却表现出不同特征。

当 $\rho_{ij} \geq 1$ 时,随着电压差下降,支路能量呈下降趋势,且下降趋势明显,表明当前电压水平能承担此时的传输任务。

当 $0 < \rho_{ij} < 1$ 时,随着电压差下降,支路能量呈现出一定的下降趋势,但其下降速率小于电压差的下降速率。此时支路能量的传输给支路造成了一定的负担,支路表现出一定程度的脆弱性。

当 $\rho_{ij} < 0$ 时,支路能量随电压差的下降而增大的趋势明显,支路传输任务明显加重,支路会表现出更强的脆弱性。

综上所述,根据脆弱灵敏度指标的物理意义,可得支路脆弱性的判据为 $\rho_{ij} < 1$ 。

将 ρ_{ij} 作为评估支路脆弱性指标其优势在于能全面量化支路传输有功无功和节点电压幅值相角对电网脆弱性的影响,物理意义清楚,且判据简单,有很强的实用价值。

2.2 脆弱程度指标

脆弱程度指标量度的是随着负荷的变化,支路能量逼近其支路能量极限的程度。

根据以上定义,提出脆弱度指标为

$$C_{ij} = \frac{|E_{ij_t} - E_{ij_cr}|}{|E_{ij_ini} - E_{ij_cr}|} \quad (9)$$

式中: E_{ij_t} 是当前运行状态下支路 ij 对应的能量; E_{ij_cr} 是支路 ij 对应的临界能量; E_{ij_ini} 是支路 ij 初始能量。

由式(9)可知, $0 \leq C_{ij} \leq 1$ 。该式能指示当前支路能量接近其支路临界能量的程度。若 C_{ij} 越小,表明在当前运行状态下,该支路能量距离其支路能量极限边界的裕度越小。即,若该支路传输的潮流不断加重,支路能量将向临界支路能量逼近,支路传输功率的脆弱特性将更加明显。

3 算例仿真

3.1 算法流程

1) 建立电网的支路静态能量函数模型,提出支路脆弱性评估指标;

2) 利用连续潮流法求解出系统崩溃点,再根据式(7)~式(9)计算不同负荷水平下支路能量、脆弱灵

敏度和脆弱程度指标,根据指标值筛选出脆弱支路并判断支路的脆弱程度;

3) 计算 $N-1$ 故障下的支路脆弱灵敏度、支路脆弱度,比较分析不同故障模式下的脆弱支路;

4) 依据步骤 2)、步骤 3),分析支路脆弱灵敏度指标和脆弱度指标对支路脆弱性的指导作用。

3.2 基态下的支路脆弱性分析

采用 IEEE-30 母线系统对本文所提指标进行研究。当系统运行状态改变,支路的脆弱性会随之变化。

现取负荷水平为 $\lambda = 0.1$, $\lambda = 0.2$, $\lambda = 0.52984$ (系统崩溃点) 三种情况进行对比分析。各仿真结果如图 2~图 4 所示,横坐标对应各支路编号。

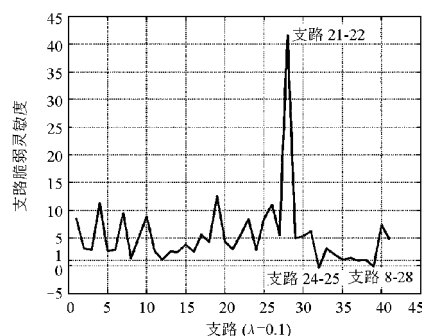


图 2 $\lambda = 0.1$ 时支路的脆弱灵敏度曲线

Fig. 2 Branch vulnerable sensitivity curve with $\lambda = 0.1$

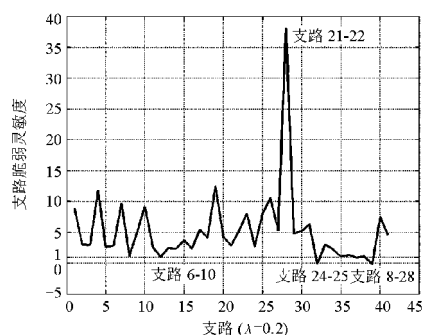


图 3 $\lambda = 0.2$ 时支路的脆弱灵敏度曲线

Fig. 3 Branch vulnerable sensitivity curve with $\lambda = 0.2$

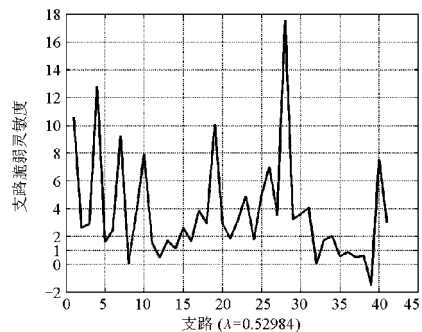


图 4 $\lambda = 0.52984$ (崩溃点) 时支路的脆弱灵敏度曲线

Fig. 4 Branch vulnerable sensitivity curve with $\lambda = 0.52984$

(collapse point of the system)

由图 2~图 4 对比可知,随着负荷水平的增大,脆弱支路逐渐增多。支路 21-22 (编号 28) 在负荷水平较轻时,该支路脆弱灵敏度值较其他支路值相差较大,表现出明显的坚强性;而随着负荷水平的增大,该支路脆弱灵敏度指标值明显减小,表明该支路在负荷增长后传输能力不断弱化。负荷水平变化后不同支路脆弱灵敏度指标的变化表明本文所提脆弱灵敏度指标对负荷波动具有灵敏性。

表 1 所列出的是在不同负荷水平下由脆弱性指标筛选出的脆弱支路。 $\lambda = 0.1$ 时,脆弱支路有 24-25、27-30、8-28;负荷增大到 $\lambda = 0.2$ 时,脆弱支路有 6-10、24-25、27-30、8-28;当负荷水平增加导致系统崩溃时 ($\lambda = 0.529\ 84$),脆弱支路增加到 8 条,包括 5-7、6-10、24-25、27-28、27-29、27-30、29-30、8-28。其中 2-5、8-28 为发电机支路,由发电机支路向系统注入的能量及能量变化量均较大,导致了距离发电机较近的该类支路脆弱。6-10 为变

压器支路,24-25、27-28、27-29、27-30、29-30 为末端支路,且都直接带负荷,传输任务很重,导致该类支路易表现出脆弱性。

从表 1 还可看出,随着负荷水平增长,脆弱支路的脆弱度指标逐渐减小,表明脆弱支路的脆弱程度会随着负荷的增加而逐渐加深。若负荷持续增长至系统崩溃点,各支路脆弱度指标值变为 0。说明本文所提的脆弱度指标与负荷的增长存在相应的递减关系,即脆弱度指标能准确的量度支路在不同负荷水平下的脆弱程度。

需要指出的是,支路的脆弱与否取决于系统运行状态。如支路 6-10 的支路脆弱灵敏度随着负荷水平的增大而减小,而支路 8-28 却先增大再减小。这是由于发电机出力或者负荷需求变化后,系统的潮流分布相应变化,这种变化是由系统结构决定,并不是简单的线性关系。

表 1 支路脆弱性评估结果

Table 1 Branch vulnerability assessment

支路	$\lambda = 0.1$		$\lambda = 0.2$		$\lambda = 0.529\ 84$	
	脆弱灵敏度	脆弱度	脆弱灵敏度	脆弱度	脆弱灵敏度	脆弱度
8(5-7)	1.097 4	0.957 66	1.126 4	0.824 62	0.070 7	0
12 (6-10)	1.067 3	0.799 86	0.982 5	0.669 85	0.480 5	0
32 (24-25)	-0.365 5	0.824 75	-0.158 0	0.754 98	-0.019 3	0
35 (27-28)	1.125 3	0.919 50	1.038 8	0.789 18	0.554 9	0
36 (27-29)	1.402 5	0.925 80	1.313 4	0.802 13	0.861 0	0
37 (27-30)	0.935 1	0.926 33	0.870 2	0.804 46	0.507 6	0
38 (29-30)	1.099 2	0.922 65	1.018 1	0.797 90	0.599 1	0
39 (8-28)	-0.490 8	0.798 44	-0.169 5	0.694 13	-1.494 0	0

3.3 $N-1$ 故障下的支路脆弱性分析

对 IEEE-30 系统进行 $N-1$ 故障下的脆弱性分析。不同支路开断时,会导致系统的拓扑结构发生变化。因此,潮流转移将导致不同支路表现出脆弱性。

遍历 $N-1$ 故障,支路 5-7、6-10、24-25、27-28、27-29、27-30、29-30、8-28 在所有 $N-1$ 故障下都表现出较大的脆弱性。限于篇幅,表 2 仅列出较严重的支路开断故障及对应故障模式下的脆弱支路。

表 2 及图 5 表明,开断临近发电机的支路 17 (12-15) 后,对系统其他支路的脆弱性影响最大,脆弱支路达 11 条。原因是靠近发电机支路承担着注入系统功率的任务,一旦该类关键支路故障退出运行,系统其他支路受关键支路断开后的潮流转移较其他非关键支路更为严重,进而系统表现脆弱的支路更多。

表 2 $N-1$ 故障下的支路脆弱性评估结果

Table 2 Branch vulnerability assessment under $N-1$ fault

断开支路	脆弱支路
7	8、12、23、25、32、35、36、37、38、39
16	8、12、14、19、32、35、36、37、38、39
17	8、12、21、28、31、32、35、36、37、38、39
19	8、12、14、32、35、36、37、38、39
24	8、12、28、31、32、35、36、37、38、39
41	8、12、25、30、32、35、36、37、38、39

通过分析比较基态下及 $N-1$ 故障下评估出的脆弱支路,IEEE-30 母线系统的关键脆弱支路(即在不同运行方式下都表现出脆弱性的支路)有 24-25、27-30、8-28,而支路 5-7、6-10、24-25、27-28、

27-29、27-30、29-30、8-28 在所有 $N-1$ 故障下都表现出一定的脆弱性。仿真结果表明, 靠近发电机的支路及网络末端支路易表现出脆弱性。这些筛选出的关键支路对系统的规划和运行具有指导意义。

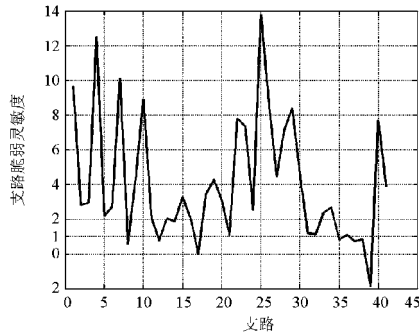


图5 断开支路 12-15 时支路的脆弱灵敏度曲线

Fig. 5 Branch vulnerable sensitivity curve with branch 12-15 cutting

4 结论

评估电力系统的脆弱支路, 对电力系统的安全运行具有实际意义。本文建立了完整的基于支路传输功率的支路能量模型, 根据脆弱性的定义, 提出了基于能量信息的支路脆弱性评估指标。理论分析和算例仿真结果表明:

1) 本文所提指标建立在静态能量函数的基础上, 综合考虑了系统的多个物理量对能量信息的映射, 较之其他方法能够更加全面且准确地反映不同运行状态下的支路脆弱性。

2) 指标的建立仅依赖系统的静态潮流, 可采用实时潮流信息计算得到, 方法简单, 思路清晰, 且静态能量模型具有计算速度优势, 可望用于在线评估。

3) 可定量分析网络中的脆弱支路, 指标值在脆弱支路处表现出明显特征, 故更易筛选出脆弱支路并判断支路的脆弱程度。

参考文献

- [1] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 基于支路势能信息的电网脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 6-11. LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Power grid vulnerability assessment based on branch potential energy information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 6-11.
- [2] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 11-14. WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. A new vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 11-14.
- [3] 李杨, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 计及动作安全裕度的节点电压脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 10-14. LI Yang, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Nodes vulnerability assessment to power grid based on action security margin[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 10-14.
- [4] 刘慧, 李华强, 郑武, 等. 基于电压脆弱性的支路事故排序快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 177-181. LIU Hui, LI Hua-qiang, ZHENG Wu, et al. Fast algorithm of branch contingency ranking based on voltage vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 177-181.
- [5] 卢锦玲, 姬群星, 朱永利. 基于能量函数法的电网脆弱性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 30-33. LU Jin-ling, JI Qun-xing, ZHU Yong-li. Power grid vulnerability assessment based on energy function[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 30-33.
- [6] 蔡国伟, 穆刚, Chan K W, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析—支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6. CAI Guo-wei, MU Gang, Chan K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6.
- [7] 赵洪山, 赵莹莹. 基于灵敏度技术的电网脆弱域评估[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 54-58. ZHAO Hong-shan, ZHAO Ying-ying. Evaluation of Power grid vulnerable region based on sensitivity technique[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 54-58.
- [8] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 12-17. CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Risk-based vulnerability assessment in complex power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 12-17.
- [9] YU Xing-bin, SINGH C. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1811-1820.
- [10] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5. CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5.

(下转第 115 页 continued on page 115)

- RTDS[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(1): 164-170.
- [10] ZHOU Yan, LIU Li-ming, LI Hui, et al. Real time digital simulation (RTDS) of a novel battery-integrated PV system for high penetration application[C] // IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010, 10(2): 786-791.
- [11] 周巍, 张沛超, 杨星星. 基于RTDS的微机保护实时闭环数字仿真系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 127-131.
ZHOU Wei, ZHANG Pei-chao, YANG Xing-xing. A real-time closed-loop digital simulation system for computer protections based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 127-131.
- [12] 王晓雷, 王卫星, 路进升, 等. 光伏阵列特性仿真及其在光伏并网逆变器测试系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 70-73.
WANG Xiao-lei, WANG Wei-xing, LU Jin-sheng, et al. Modeling of PV array characteristic and application in testing system of PV grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 70-73.
- [13] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 73-77.
WU Li-bo, ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. Research on the stability of MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 73-77.
- [14] Caldron R, Rossetto E, Turrir. Analysis of dynamic performance of dispersed generation connected through inverter to distribution networks[C] // 17th International Conference on Electricity Distribution, 2003: 12-15.
-
- 收稿日期: 2011-09-15; 修回日期: 2011-11-16
作者简介:
苏丽萍(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微网运行与控制; E-mail:sulipingslp@163.com
陈侃(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电;
李国杰(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制, 新能源。

(上接第11页 continued from page 11)

- [11] CHEN Xiao-gang, SUN Ke, CAO Yi-jia, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[C] // Power Engineering Society General Meeting. Florida, USA: [s.n.], 2007: 1-6.
- [12] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
DING Ming, HAN Ping-ping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [13] 魏震波, 刘俊勇, 李俊, 等. 基于P, Q网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 19-22.
WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, LI Jun, et al. Vulnerability analysis of electrical power network under a directed-weighted topological model based on the P-Q networks decomposition[J]. Power System Protecting and Control, 2010, 38(24): 19-22.
- [14] 郑武, 李华强, 刘慧, 等. 基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 79-83.
ZHENG Wu, LI Hua-qiang, LIU Hui, et al. Voltage weak node assessment based on static energy function. Power System Protecting and Control, 2010, 38(14): 79-83.
- [15] OVERBYE T J, DEMARCO C. Improved techniques for power system voltage stability assessment using energy methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(4): 1446-1452.
- [16] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 74.
LIU Tian-qi, QIU Xiao-yan. Power system analysis theory[J]. Beijing: Science Book Co, 2005: 74.
- [17] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[J]. USA: Kluwer Academic Publisher, 1989.
-
- 收稿日期: 2011-09-09
作者简介:
黄昭蒙(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、稳定及优化问题研究; E-mail: rellet@126.com
李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。