

负荷静态特性对 PV 曲线的影响

李林, 钟亨君

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘要:以单负荷无穷大系统为研究对象, 负荷采用幂指数静态负荷模型, 通过数学理论分析了负荷静态特性对 PV 曲线的影响, 并分析了不同负荷模型的 λV 曲线和 PV 曲线的变化趋势及对系统电压稳定性进行了比较。分析结果表明: 只有在恒功率负荷的模型下 λV 曲线的鼻端对应于 PV 曲线的鼻端, 非恒功率负荷的模型下 λV 曲线的鼻端对应于 PV 曲线的下半支, 和恒功率负荷最易失去稳定性, 而恒阻抗负荷不存在不稳定的问题。最后通过仿真验证了理论分析的结果。

关键词:电压稳定; 负荷静态特性; PV 曲线

Abstract: Taking the single load infinite bus system as the investigated subject, the exponential static load model is used. The influence of load static characteristics on PV curves is analyzed according to mathematical theory. The change trend of λV curves and PV curves of different load models is analyzed and the voltage stability of the system is compared. The analysis results show that the nose of λV curves corresponds to the nose of PV curves only in constant power load model, the nose of λV curves corresponds to the second half of PV curves in non-constant power load model and the constant power load loses the stability easily, while the constant impedance load does not exist the problem of instability. The simulation results verify the theoretical analysis at last.

Key words: voltage stability; load static characteristics; PV curve

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0060-04

随着电力市场化的改革以后, 市场参与者要求增加电网输送能力和稳定限额, 将使电力系统的运行条件变得更为紧张, 很容易出现电力系统电压稳定性问题^[1]。电压稳定性在很大程度上受负荷特性的影响^[2-4]。Taylor C. W. 甚至指出, 电压稳定性问题实质上就是负荷稳定性问题^[5]。在潮流计算中负荷的模型一般都取恒定功率模型^[6], 这必然会引起一定的误差。因为恒定功率负荷, 电压的稳定极限对应于最大功率传输点, 然而对于恒定功率、恒定电流和恒定阻抗负荷来说, 电压失稳的条件发生了变化, 负荷曲线也发生了相应的变化。

文献[7]通过静态负荷模型和潮流雅可比矩阵的结构和特点进行了分析, 得出根据 PV 曲线拐点或常规潮流雅可比矩阵的奇异性来判断系统的电压稳定性, 则所得的结果既可能保守, 也可能冒进; 文献[8]考虑了不同的负荷静态特性对电压稳定性的影响, 得出恒功率负荷模型比恒电流负荷、恒阻抗负荷模型更易失去稳定性, 使用恒功率负荷模型进行系统分析, 所得的结论会偏保守。这两篇文章都只分析了负荷不同模型对 PV 曲线的影响, 没有对比 λV 曲线

与 PV 曲线的不同。下面从数学公式推导出不同负荷模型对 λV 曲线与 PV 曲线的影响, 并比较了两者的不同, 最后通过仿真曲线验证了得出的结论。

1 负荷模型

1.1 负荷静态模型

负荷静态模型有两种, 即幂函数模型和多项式模型^[9]。

(1) 幂函数模型

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_v} \\ Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_v} \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_0 为负荷额定电压; P_0 、 Q_0 表示在额定电压下 $U = U_0$ 时负荷所消耗的有功功率和无功功率; p_v 、 q_v 是负荷模型电压特性指数, 其值决定了负荷的类型。

特别是当 p_v 、 q_v 的值都等于 0、1、2 时, 表示的负荷模型分别为恒功率负荷模型、恒功率负荷模型和恒阻抗负荷模型。当 p_v 、 q_v 的值等于其他数值可以表

示不同类型负荷元件的综合特性。

(2) 多项式模型

由于实际电力系统仿真计算中所需要的通常是系统各节点的综合负荷特性。因此将恒阻抗负荷、恒电流负荷和恒功率负荷按一定比例的组合,即负荷的多项式模型,也叫 ZIP 负荷模型。

$$\begin{cases} P = P_0 [a_p (U/U_0)^2 + b_p (U/U_0) + c_p] \\ Q = Q_0 [a_q (U/U_0)^2 + b_q (U/U_0) + c_q] \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_p 、 b_p 、 c_p 分别为恒定阻抗、恒定电流、恒定功率负荷的有功功率占总功率的百分比,并且 $a_p + b_p + c_p = 1$; a_q 、 b_q 、 c_q 分别为恒定阻抗、恒定电流、恒定功率负荷的无功功率占总无功功率的百分比,并且 $a_q + b_q + c_q = 1$ 。

1.2 负荷动态模型

负荷动态模型按照它是否以实际物理元件的数学模型为基础分为非机理性动态模型和机理性动态模型两类^[10]。由于这里主要分析的是负荷的静态特性对电压稳定 PV 曲线的影响,所以对动态负荷模型就不在叙述,详情请参考文献[11-13]。

2 负荷静态特性对 PV 曲线影响的数学模型

由于负荷特性对电力系统的电压稳定性有着极其重要的影响,而 PV 曲线反映了负荷功率和电压之间的关系,因此定性分析 PV 曲线具有重要的意义。为了能从机理方面研究负荷特性对电压稳定性的影响,可将复杂网络简化为如图 1 所示的单负荷无穷大系统。

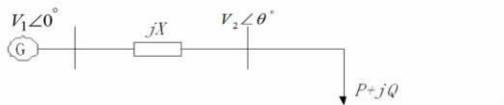


图1 单负荷无穷大系统

$E \angle 0$ 为无穷大系统的电压; $U \angle \theta$ 为负荷母线电压; X 为网络的等效电抗; $P + jQ$ 为系统负荷功率。根据潮流计算有如下表达式。

$$\begin{cases} P = \frac{EU \sin \theta}{X} \\ Q = \frac{EU \cos \theta - U^2}{X} \end{cases} \quad (3)$$

设系统初始运行状态负荷功率为 P_0 、 Q_0 , 初始运行电压为 U_0 , 负荷增长因子为 λ ($\lambda \geq 0$), 负荷模型选幂函数模型, 即

$$\begin{cases} P = (1 + \lambda) P_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{p_v} \\ Q = (1 + \lambda) Q_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{q_v} \end{cases} \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)可得

$$\left[(1 + \lambda) P_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{p_v} \right]^2 + \left[\frac{U^2}{X} + (1 + \lambda) Q_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{q_v} \right]^2 = \left[\frac{EU}{X} \right]^2 \quad (5)$$

3 理论分析及仿真

分析负荷静态特性对系统电压稳定 PV 的影响, 对图 1 采用连续潮流进行分析, 图中参数 $E = 1$, $X = 0.2$, $P_0 = 0.8$, $Q_0 = 0.2$, $U_0 = 1$ 。

3.1 恒功率负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $p_v = q_v = 0$ 时, 即为恒功率负荷模型。式(5)可以等效为

$$(P_0^2 + Q_0^2) X^2 (1 + \lambda)^2 + 2Q_0 X U^2 (1 + \lambda) + (U^4 - E^2 U^2) = 0 \quad (6)$$

上式方程两边同时对 U 求导可得

$$\frac{d\lambda}{dU} = \frac{U [E^2 - 2U^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]}{(P_0^2 + Q_0^2) X^2 (1 + \lambda) + Q_0 X U^2} \quad (7)$$

式(7)中分母是大于零的, 电压幅值也是大于零的, 因此只需要讨论分子中括号里面式子的大小关系。

当 $U^2 < [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]/2$ 时, $d\lambda/dU > 0$, 对应的 λV 曲线成增函数趋势。

当 $U^2 > [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]/2$ 时, $d\lambda/dU < 0$, 对应的 λV 曲线成减函数趋势。

当 $U^2 = [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]/2$ 时, $d\lambda/dU = 0$, 对应的 λV 曲线达到负荷最大值。

因此, 负荷为恒功率负荷模型时, 对应的 λV 曲线由两条单调曲线合成, 根据潮流多解理论, 这两条单调曲线分别是两个可行解的运行轨迹, 当到达曲线的 $d\lambda/dU = 0$ 处, 此时两个潮流解重合。对应的最大负荷因子 λ_{\max} 和临界电压 U_{cr} 的计算过程如下。

把 $U^2 = [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]/2$ 代入到式(6)可得

$$1 + \lambda = \frac{E^2 (-Q_0 \pm \sqrt{P_0^2 + Q_0^2})}{2XP_0^2} \quad (8)$$

由于 $1 + \lambda > 0$, 式(8)分子括号中只能取正, 则有

$$1 + \lambda_{\max} = \frac{E^2 (-Q_0 + \sqrt{P_0^2 + Q_0^2})}{2XP_0^2} \quad (9)$$

把式(9)代入 $U^2 = [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]/2$, 由于电压幅值只能为正, 则有

$$U_{cr} = \frac{E}{\sqrt{2P_0}}(P_0^2 + Q_0^2 - Q_0 \sqrt{P_0^2 + Q_0^2})^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

绘制负荷的 λV 曲线和 PV 曲线如图 2 所示。

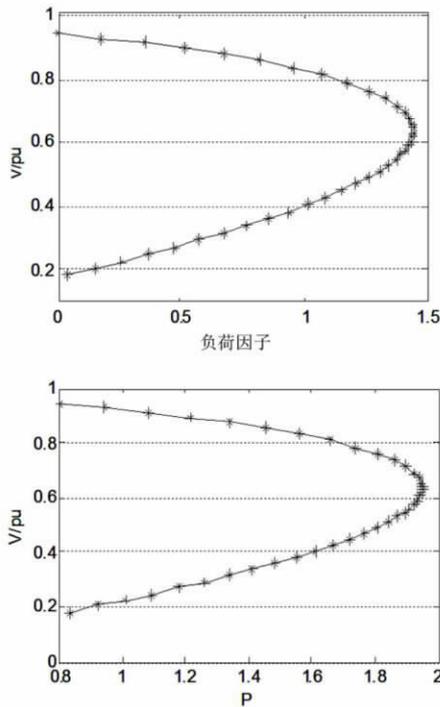


图 2 恒功率负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线

恒功率负荷模型时, 负荷增长因子 λ 与负荷的功率 P 是成正比关系, 所以绘制出的 λV 曲线和 PV 曲线形状是一样的, 并且 PV 曲线的拐点与潮流雅可比矩阵奇异和最大负荷功率点一致。从图 2 可以看出, 曲线是由增函数曲线和减函数曲线在 $\lambda_{max} = 1.44$ 即最大负荷功率 $P_{max} = 1.952$ 处合成一条曲线。因此, 只有在上半支曲线运行时系统才是稳定的。

3.2 恒电流负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $p_v = q_v = 1$ 时, 即为恒电流负荷模型。

式(5)可以等效为

$$\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2}{U_0^2} (1 + \lambda)^2 + \frac{2Q_0 X U}{U_0} (1 + \lambda) + (U^2 - E^2) = 0 \quad (11)$$

上式方程两边同时对 U 求导可得

$$\frac{d\lambda}{dU} = - \frac{U + \frac{Q_0 X}{U_0} (1 + \lambda)}{\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2}{U_0^2} (1 + \lambda) + \frac{Q_0 X U}{U_0}} \quad (12)$$

从式(12)中易知 $d\lambda/dU < 0$, 对应的 λV 曲线成单调减函数趋势。根据潮流多解理论, 这条单调曲线是一个可行解的运行轨迹, 即恒电流负荷模型对应一个潮流可行解。

绘制负荷的 λV 曲线和 PV 曲线如图 3 所示。

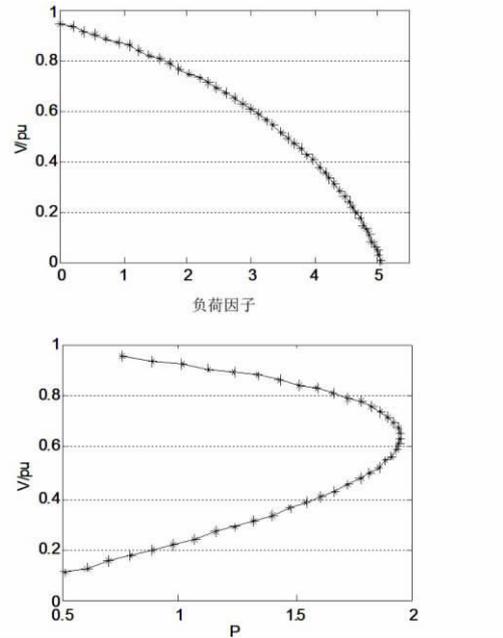


图 3 恒电流负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线

从图 3 可以看出, 恒电流负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线的形状不一样, 这是由于负荷增长因子 λ 与负荷的功率 P 的关系中计及了节点电压的幅值。 λV 曲线正如公式分析一样, 是一条单调递减的曲线。此时 $\lambda_{max} = 5.05$ 并不对应 PV 曲线的拐点, 而在 PV 曲线的下半支。因此在 PV 曲线的下半支运行时系统也可能是稳定的。

3.3 恒阻抗负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $p_v = q_v = 2$ 时, 即为恒阻抗负荷模型。

式(5)可以等效为

$$\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2 U^2}{U_0^2} (1 + \lambda)^2 + \frac{2Q_0 X U^2}{U_0} (1 + \lambda) + (U^2 - E^2) = 0 \quad (13)$$

上式方程两边同时对 U 求导可得

$$\frac{d\lambda}{dU} = - \frac{\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2}{U_0^2} (1 + \lambda)^2 + \frac{2Q_0 X}{U_0} (1 + \lambda) + 1}{\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2 U}{U_0^2} (1 + \lambda) + \frac{Q_0 X U}{U_0}} \quad (14)$$

式(14)中分母为正, 因此只需要讨论分子的大小关系。

分子关于 $1 + \lambda$ 的一元二次方程, 其函数图像是开口向上的抛物线, 并且有

$$\Delta = - \left(\frac{2P_0 X}{U_0} \right) < 0 \quad (15)$$

所以, 分子也为正, 则 $d\lambda/dU < 0$, 对应的 λV 曲线也成单调减函数趋势。根据潮流多解理论, 这条单调曲线也是一个可行解的运行轨迹, 即恒阻抗负荷模

型也对应一个潮流可行解。

绘制负荷的 λV 曲线和 PV 曲线如图4所示。

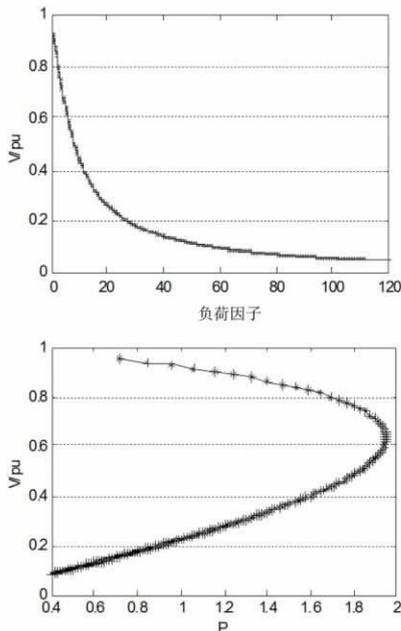


图4 恒阻抗负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线

从图4可以看出,恒阻抗负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线的形状也不一样, λV 曲线也是一条单调递减的曲线,但是曲线不存在负荷因子的最大值 λ_{max} 。因此,恒阻抗负荷模型不存在系统稳定性问题。

3.4 混合负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $0 < p_v = q_v < 1$ 及 $1 < p_v = q_v < 2$ 时,即为混合负荷模型。此时由于公式比较复杂,下面通过 λV 曲线图分别做简要的分析。

1. $0 < p_v = q_v < 1$

此时的负荷模型相当于是恒功率、恒电流和恒阻抗负荷混合模型,且恒功率负荷所占比例较大。图5描述了 $p_v = q_v = 0.3$ 、 $p_v = q_v = 0.6$ 、 $p_v = q_v = 0.8$ 的 λV 曲线。

从图5可以看出,当 $p_v = q_v = 0.3$ 、 $p_v = q_v = 0.6$ 时,系统始终存在两个解(增函数曲线轨迹和减函数曲线轨迹),而当 $p_v = q_v = 0.8$ 时,在负荷因子 λ 的初始取值的情况下只有一个潮流解,随着 λ 增大到一定程度时系统开始出现两个潮流解。并且随着负荷因子 λ 的增长,系统都存在 λ 取值极限,对应潮流极限,并且在潮流极限点两个解重合,对应的负荷因子的最大值 λ_{max} 逐渐增大。

2. $1 < p_v = q_v < 2$

此时的负荷模型也相当于是恒功率、恒电流和恒阻抗负荷混合模型,且恒阻抗负荷所占比例较大。图6描述了 $p_v = q_v = 1.3$ 、 $p_v = q_v = 1.6$ 、 $p_v = q_v = 1.9$ 的 λV 曲线。

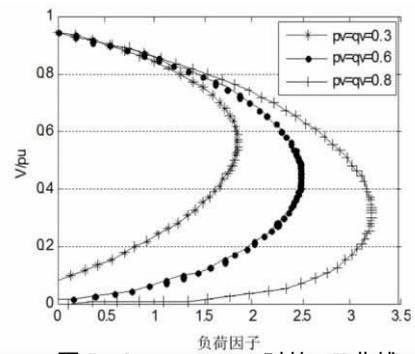


图5 $0 < p_v = q_v < 1$ 时的 λV 曲线

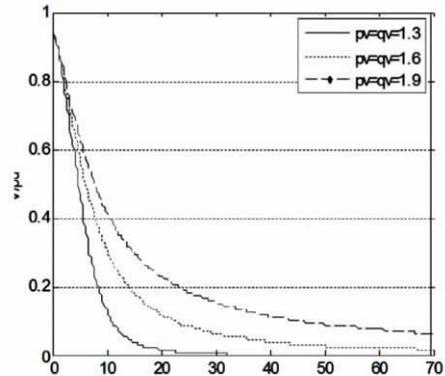


图6 $1 < p_v = q_v < 2$ 时的 λV 曲线

从图6可以看出,只要 $p_v = q_v > 1$ 所对应的 λV 曲线都是单调递减变化的。随着 p_v 、 q_v 的增加, λV 曲线从存在负荷因子的最大值 λ_{max} 到不存在 λ_{max} 。即随着恒阻抗负荷成分的增加,系统的稳定性增强。

4 结 论

通过对单负荷无穷大系统的研究,采用幂指数静态负荷模型,从数学理论分析了负荷静态特性对 PV 曲线的影响,并分析了不同负荷模型的 λV 曲线和 PV 曲线的变化趋势,同时通过仿真分析了负荷特性对电压稳定性的影响,从而验证了数学理论分析的结果。

参考文献

[1] 李林,康积涛,张学群,等. 感应电动机参数对小干扰电压稳定影响[J]. 四川电力技术, 2010, 33(3): 68-70.

[2] Pal M. K. Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics [J]. IEEE Trans. on power systems, 1992, 7(1): 243-249.

[3] Milosevic B., Begovic M. Voltage Stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements [J]. IEEE Trans. on Power Systems 2003, 18(1): 121-127.

(下转第88页)

(3): 222 - 226.

[7] 杨宗麟. 华东电网负荷特性分析预测 [J]. 华东电力 2008, 36(5): 50 - 52.

[8] 张吉军. 模糊一致判断矩阵3种排序方法的比较研究 [J]. 系统工程与电子技术 2003, 25(11): 1370 - 1372.

[9] 葛少云, 闫大威, 董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆化改造 [J]. 现代电力 2005, 22(3): 37 - 40.

[10] 霍成军. 电力系统负荷特性分析研究 [D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院 2007.

[11] 仲伟宽. 数据挖掘技术在负荷特性分析中的应用 [D]. 南京: 东南大学电气工程学院 2006.

[12] 杜海文, 孟岭坡, 马洪斌. 防空导弹制导雷达综合抗干扰能力评估 [J]. 火力与指挥控制 (Fire Control & Command Control), 2004, 29(5): 54 - 56.

[13] 张江, 应俊, 王琼, 等. 基于FAHP的电力变压器系统的脆性分析 [J]. 控制理论与应用 2004, 23(7): 9 - 12.

[14] 沈又幸, 范艳霞, 谢传胜. 基于FAHP法的风电项目后评估研究 [J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(6): 16 - 18.

[15] 高会生, 冉静学, 孙逸群. 基于改进的FAHP电力通信网风险评估 [J]. 系统工程理论与实践 2008, (3): 133 - 138.

作者简介:

徐飞(1987)男, 硕士研究生, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

周步祥(1965)男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的研究和教学工作;

林楠(1973)女, 硕士, 讲师, 从事电力系统自动化、计算机应用的研究和教学工作.

(收稿日期: 2011-07-18)

(上接第63页)

[4] Overbye T. J. Effects of Load Modeling on Analysis of Power System Voltage Stability [J]. International Electrical Power Energy System, 1994, 16(5): 329 - 338.

[5] Carson W. Taylor. Power System Voltage Stability [M]. 北京: 中国电力出版社 2001.

[6] M. H. Haque. On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of a Power System Within the Voltage Stability Limits [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution 2003, 150(1): 107 - 112.

[7] 孙倩薇, 杨兴华. 负荷特性对静态电压稳定性的影响 [J]. 黑龙江电力 2005, 27(6): 413 - 416.

[8] 侯明. 不同负荷模型对电压稳定性分析的影响研究 [D]. 天津: 天津理工大学 2007.

[9] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社 2008.

[10] 李超, 马幼捷, 周雪松, 等. 负荷动态特性及模型对分析电压稳定性影响的综述 [J]. 自动化与仪表 2005 (7): 17 - 20.

[11] 段献忠, 江馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(5): 60 - 68.

[12] 周文, 贺仁睦, 章健, 等. 电力负荷建模问题研究综述 [J]. 现代电力, 1999, 16(2): 83 - 89.

[13] Ohtsuki H., Yokoyama A., Sekine Y.. Reverse Action of On-load Tap Changer in Association with Voltage Collapse [J]. IEEE Trans. on Power System, 1991, 6(1): 300 - 306.

作者简介:

李林(1984)男, 硕士, 主要从事电力系统稳定运行与控制的研究.

(收稿日期: 2011-06-01)

(上接第70页)

地断开故障主变压器保留非故障主变压器, 最大限度地保留负荷。

3 结论

通过运行人员调整综合回路法所述的相关硬压板和装置的软压板, 利用备自投装置的广义进线自投逻辑和广义桥备投逻辑, 实现对所有运行方式备自投控制策略。该方法对运行方式没有限制, 并可以节省一台备自投装置及其相关回路的投资。实验证明, 这是一种有效、简单、经济、实用的方法, 对备自投的分析研究及电网安全、稳定、可靠、经济的运行具有重要的现实意义。

参考文献

[1] 崔凤亮, 周家春. 远方备用电源自动投入装置 [J]. 电力自动化设备 2002, 22(9): 61 - 62.

[2] 国电南瑞科技股份有限公司, NSR600RF 系列保护测控装置技术说明书 [Z]. 南京 2008.

[3] 汤大海. 基于双电源扩大内桥的备自投解耦控制策略 [J]. 电力系统自动化 2009, 33(23): 103 - 106.

[4] 郁家麟. 扩大内桥接线的备用电源自动投入的探讨 [J]. 电力建设 2007, 28(1): 34 - 38.

作者简介:

张建军(1983)男, 硕士, 助理工程师, 从事继电保护工作;

姚越兰(1977)女, 大学本科, 助理工程师, 从事变电运行管理工作.

(收稿日期: 2011-06-16)