

功率型负荷的调压控制方式对负荷端电压稳定的影响

徐涛¹, 康海珍¹, 张振程², 刘宇航¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特金川开发区 010080; 2. 鄂尔多斯康巴什供电局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 随着现代电力系统所涉及的自动控制、电力电子技术方面大功率负荷的日益增多, 负荷特性多表现为功率形式从而使负荷特性呈现出与早期电力系统阻抗型负荷或电压源型负荷所不同的特点。运用交流电路运行基本规律, 分析了功率型负荷的运行特性, 指出对于功率型负荷, 采用传统的调节送端电压以稳定受端电压的常规控制方式可能导致受端电压失稳。讨论了在不同负荷特性下, 如何维持受端电压稳定。

关键词: 功率型负荷; 交流电路; 电压控制; 电压稳定

Influence of voltage regulating and control mode for power type load on voltage stability of load side

XU Tao¹, KANG Hai-zhen¹, ZHANG Zhen-cheng², LIU Yu-hang¹

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Eerdos Kangbashaen Power Supply Company, Eerdos 017000, China)

Abstract: With the increasing of power type load which concerns the aspects of automation control and power electronic in modern power system, characteristics for load are in the form of power, and different characteristics are shown to compare with impedance type load and voltage source type load in early power system. The characteristics of power type load is analyzed by basic operating law for alternating current circuit and it is pointed that taking traditional regulating voltage mode that adjusts sending end voltage to stabilize accepting end voltage may result in the accepting end voltage instable. How to maintain the accepting end voltage stable in different type load is discussed.

Key words: power type load; alternating current circuit; voltage control; voltage stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0009-04

0 引言

电压稳定问题分析中,潮流多解及N-R潮流雅可比矩阵结构的分析法^[1-3],从潮流非线性方程组计算方面讨论电压稳定问题;以非线性控制系统理论为基础的灾变^[4]、混沌^[5]、分叉^[6]及能量函数法^[7]等,从数学解析的角度讨论电压稳定问题;动态分析法从微分、差分方程的数值求解角度讨论电压稳定问题。突出物理概念的最大功率法^[8]及元件运行特性分析^[9],以电路理论为基础,致力于求取网络的最大传输功率,其研究结果也是前几类电压稳定分析的物理解释,因而至今仍是电压稳定问题的研究热点之一。值得注意的是,在影响电压稳定的众多因素中,用负荷特性探讨电压失稳机理已受到广泛关注。

电力系统可用微分代数方程的形式表示^[10],其中电力网络的代数方程是稳态交流电路方程组。由

于现代自动控制、电力电子技术的大功率负荷的出现,使得负荷特性多表现为功率形式^[11,12],即

$\frac{\partial P}{\partial V} \leq 0$ 或 $\frac{\partial Q}{\partial V} \leq 0$ 。电力网络的非线性代数方程就呈

现出与阻抗型负荷即 $\frac{\partial P}{\partial V} > 0$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial V} > 0$, 或电压源型

负荷不同的特性。在电力系统电压稳定分析中不适宜将负荷表示为阻抗,否则将会湮灭非线性代数方程的重要特征。

1 功率型负荷交流电路的运行特性的分析

联接送端S、受端R的支路示于图1中,该支路具有电阻 r_{SR} 、电抗 x_{SR} (将该支路两端的接地支路并入该支路的两端节点考虑),取S、R端的电压为 V_S 、 V_R ,支路电流为 I_{SR} ,支路送端输入的功率为 P_{SR} 、 Q_{SR} ,受端输出的功率为 P_{RS} 、 Q_{RS} 。

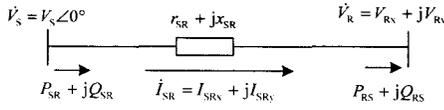


图1 简单交流电路

Fig.1 A simple alternating current circuit

图1电路的支路电压方程为

$$V_{R_x} = V_s - (I_{SR_x} r_{SR} - I_{SR_y} x_{SR}) \quad (1)$$

$$V_{R_y} = -(I_{SR_x} x_{SR} + I_{SR_y} r_{SR}) \quad (2)$$

图1电路受端的输出功率为

$$P_{RS} = V_{R_x} I_{SR_x} + V_{R_y} I_{SR_y} \quad (3)$$

$$Q_{RS} = V_{R_y} I_{SR_x} - V_{R_x} I_{SR_y} \quad (4)$$

图1电路的运行点为式(1)~(4)方程组的解。

在式(1)~(4)中, 消去其电压分量, 该方程组可表示为

$$P_{RS} = V_s I_{SR_x} - (I_{SR_x}^2 + I_{SR_y}^2) r_{SR} \quad (5)$$

$$Q_{RS} = -V_s I_{SR_y} - (I_{SR_x}^2 + I_{SR_y}^2) x_{SR} \quad (6)$$

在式(1)~(4)中, 消去其电流分量后, 该方程组又可表示为

$$P_{RS} = -g_{SR} V_{R_x}^2 + g_{SR} V_s V_{R_x} - g_{SR} V_{R_y}^2 + b_{SR} V_{R_y} V_s \quad (7)$$

$$Q_{RS} = b_{SR} V_{R_x}^2 - b_{SR} V_s V_{R_x} + b_{SR} V_{R_y}^2 + g_{SR} V_{R_y} V_s \quad (8)$$

式(7)、(8)中, 支路导纳:

$$g_{SR} + jb_{SR} = \frac{r_{SR} - jx_{SR}}{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}$$

一般输电线路中的电纳 $b_{SR} < 0$, 为突出无功功率正负的数学意义, 取 $g = g_{SR}$, $b = -b_{SR}$ 。则以电流分量为变量的式(5)、(6)的二元二次方程组的圆的标准形式为

$$\left(I_{SR_x} - \frac{V_s}{2r_{SR}} \right)^2 + I_{SR_y}^2 = \frac{V_s^2}{4r_{SR}^2} - \frac{P_{RS}}{r_{SR}} \quad (9)$$

$$I_{SR_x}^2 + \left(I_{SR_y} + \frac{V_s}{2x_{SR}} \right)^2 = \frac{V_s^2}{4x_{SR}^2} - \frac{Q_{RS}}{x_{SR}} \quad (10)$$

以电压分量为变量的式(7)、(8)的二元二次方程组的圆的标准形式为

$$\left(V_{R_x} - \frac{V_s}{2} \right)^2 + \left(V_{R_y} + \frac{b}{2g} V_s \right)^2 = \frac{V_s^2}{4} + \frac{b^2 V_s^2}{4g^2} - \frac{P_{RS}}{g} \quad (11)$$

$$\left(V_{R_x} - \frac{V_s}{2} \right)^2 + \left(V_{R_y} - \frac{g}{2b} V_s \right)^2 = \frac{V_s^2}{4} + \frac{g^2 V_s^2}{4b^2} - \frac{Q_{RS}}{b} \quad (12)$$

显然, 式(9)、(10)方程组和式(11)、(12)方程组与式(1)~(4)的同解。令式(9)、(10)、(11)、(12)表示的圆和该圆的半径分别为 C_P 、 R_P 、 C_Q 、 R_Q 、 V_P 、 r_P 、 V_Q 、 r_Q 。圆 C_P 、 C_Q 、 V_P 、 V_Q 的圆心坐标分别为

$$O_P : \left(\frac{V_s}{2r_{SR}}, 0 \right) \quad O_Q : \left(0, -\frac{V_s}{2x_{SR}} \right)$$

$$O'_P : \left(\frac{V_s}{2}, -\frac{bV_s}{2g} \right) \quad O'_Q : \left(\frac{V_s}{2}, \frac{gV_s}{2b} \right)$$

半径分别为

$$R_P = \sqrt{\frac{V_s^2}{4r_{SR}^2} - \frac{P_{RS}}{r_{SR}}} \quad (13)$$

$$R_Q = \sqrt{\frac{V_s^2}{4x_{SR}^2} - \frac{Q_{RS}}{x_{SR}}} \quad (14)$$

$$r_P = \sqrt{\frac{V_s^2}{4} + \frac{b^2 V_s^2}{4g^2} - \frac{P_{RS}}{g}} \quad (15)$$

$$r_Q = \sqrt{\frac{V_s^2}{4} + \frac{g^2 V_s^2}{4b^2} - \frac{Q_{RS}}{b}} \quad (16)$$

在式(13)~(16)中, R_P 、 r_P 大于等于零的条件均为 $P_{RS} \leq \frac{V_s^2}{4r_{SR}}$, R_Q 、 r_Q 大于等于零的条件均为 $Q_{RS} \leq \frac{V_s^2}{4x_{SR}}$ 。圆心的坐标与送端电压和支路参数有关, 与负荷无关, 圆的半径随负荷的增大而缩小。显然, 式(9)、(10)或式(11)、(12)有解的条件为两圆的半径大于或等于零且两圆相交或相切。本文仅讨论当两圆相交多运行点的情况, 将 C_P 、 C_Q 相交的情况作于图2中, 将 V_P 、 V_Q 相交的情况作于图3中。由图2可知, 在同一负荷功率下, 电路存在两个运行点, 且图2、图3的 P_1 、 P_2 分别是图1电路的两个运行点在电流、电压方面的表现。

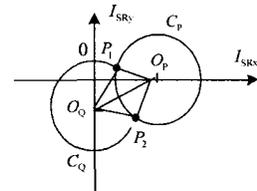


图2 电流坐标的相交圆

Fig.2 Two circulars are intersecting current in coordinate

图3中以无功负荷 Q_{RS} 恒定, 有功负荷 P_{RS} 变化为例, 分析运行点的变化情况。设原运行点为 P_1 , 随有功负荷 P_{RS} 的增大, 圆 V_P 的半径 r_P 缩小, 圆 V_P 、 V_Q 的交点左移, 运行点沿 V_Q 左移变动。当 V_P 、 V_Q 相切, 运行点移至 V_Q 的最低点, 这是在恒定的 Q_{RS} 下, 有功负荷 P_{RS} 达最大值的运行点。

若负荷为功率型, 再继续增大负荷, 是再增大负荷功率, 则随 r_P 的继续缩小, V_P 、 V_Q 无交点, 方程式(11)、(12)无解。若负荷仍要保持原功率特性, 电路将无法运行, 则负荷必将失去原工作特性, 落入异常域中。例如异步电动机转子堵转的停顿、荧光灯气体放电停止。这种负荷不能保持原工作特性

的现象, 称之为电压崩溃。

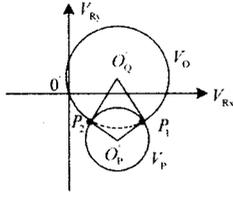


图3 电压坐标的相交圆

Fig.3 Two circulars are intersecting in voltage coordinate

若负荷为阻抗型, 再继续增大负荷, 是再增大负荷导纳, 运行点进入 $V_{R_x} < \frac{V_S}{2}$ 的运行状态。随负荷导纳再继续增大, 运行点沿 V_Q 左移。当运行点移到 P_2 点时, 负荷导纳消耗的功率与 P_1 点相同, 而从图 1 电路看, 则是接入两种不同负荷导纳, 具有相同功率、不同电压、电流的表现。

图 2 中, 取 $\alpha_Q = \angle OO_Q O_p$ 、 $\beta_Q = \angle P_1 O_Q O_p$ 、 $\alpha_p = \angle OO_p O_Q$ 、 $\beta_p = \angle P_2 O_p O_Q$, 在直角三角形 $OO_Q O_p$ 和斜三角形 $P_1 O_Q O_p$ 中, 根据余弦定理等得运行点 P_1 的电流分量为

$$I_{SRx1} = \frac{R_Q}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (x_{SR} \cos \beta_Q - r_{SR} \sin \beta_Q) \quad (17)$$

$$I_{SRy1} = -\frac{V_S}{2x_{SR}} + \frac{R_Q}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (r_{SR} \cos \beta_Q + x_{SR} \sin \beta_Q) \quad (18)$$

运行点 P_2 的电流分量为

$$I_{SRx2} = \frac{V_S}{2r_{SR}} - \frac{R_p}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (x_{SR} \cos \beta_p - r_{SR} \sin \beta_p) \quad (19)$$

$$I_{SRy2} = -\frac{R_p}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (r_{SR} \cos \beta_p + x_{SR} \sin \beta_p) \quad (20)$$

对于图 2 中的 P_1 、 P_2 运行点, 其电压分量分别为图 3 中的 V_{Rx1} 、 V_{Ry1} 、 V_{Rx2} 、 V_{Ry2} 。由图 3 可知, P_1 是高电压解 (小相位差) 运行点, P_2 是低电压解 (大相位差) 运行点。在图 3 中, 取 $\gamma_p = \angle O'_Q O'_p P_1$, 由图 3 分析及公式(7)、(8)可得

$$V_{Rx1} = \frac{V_S}{2} + r_p \sin \gamma_p \quad (21)$$

$$V_{Rx2} = \frac{V_S}{2} - r_p \sin \gamma_p \quad (22)$$

则图 2-1 电路运行点 P_1 的送端功率为

$$P_{SR1} = V_S I_{SRx1} = \frac{V_S R_Q}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (x_{SR} \cos \beta_Q - r_{SR} \sin \beta_Q) \quad (23)$$

$$Q_{SR1} = -V_S I_{SRy1} = \frac{V_S^2}{2x_{SR}} - \frac{V_S R_Q}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (r_{SR} \cos \beta_Q + x_{SR} \sin \beta_Q) \quad (24)$$

对运行点 P_2 ,

$$P_{SR2} = V_S I_{SRx2} = \frac{V_S^2}{2r_{SR}} - \frac{V_S R_p}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (x_{SR} \cos \beta_p - r_{SR} \sin \beta_p) \quad (25)$$

$$Q_{SR2} = -V_S I_{SRy2} = \frac{V_S R_p}{\sqrt{r_{SR}^2 + x_{SR}^2}} (r_{SR} \cos \beta_p + x_{SR} \sin \beta_p) \quad (26)$$

2 不计电阻时功率型负荷的运行特性的分析

不计电阻的情况是便于物理概念分析的简明情况, 也是接近于高压输电网络和同步发电机稳态运行的情况。取基准电压 $V_B = V_S$, 基准功率

$S_B = \frac{V_S^2}{x_{SR}}$, 当 $r_{SR} = 0$ 时, 式 (5)、(6) 的解的标么值形式为

$$I_{SRx}^* = P_{RS}^* \quad (27)$$

$$I_{SRy}^* = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - Q_{RS}^* - P_{RS}^2} \quad (28)$$

$g_{SR} = 0$ 时式 (7)、(8) 解的标么值为

$$V_{Rx}^* = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - Q_{RS}^* - P_{RS}^2} \quad (29)$$

$$V_{Ry}^* = -P_{RS}^* \quad (30)$$

高、低电压解运行点的输入无功功率为

$$Q_{SR1}^* = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - Q_{RS}^* - P_{RS}^2} \quad (31)$$

$$Q_{SR2}^* = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - Q_{RS}^* - P_{RS}^2} \quad (32)$$

即 $Q_{SR}^* < \frac{1}{2}$ 或 $V_{Rx}^* > \frac{1}{2}$ 为高电压运行点,

$Q_{SR}^* > \frac{1}{2}$ 或 $V_{Rx}^* < \frac{1}{2}$ 为低电压运行点。

令支路 SR 的负荷等值导纳为 $y_L = g_L + jb_L$ 则

$$y_L = g_L + jb_L = \frac{P_{RS} - jQ_{RS}}{V_R^2} \quad (33)$$

$$g_L + jb_L = \frac{P_{RS}^* - jQ_{RS}^*}{\frac{1}{2} - Q_{RS}^* \pm \sqrt{\frac{1}{4} - Q_{RS}^* - P_{RS}^2}} \quad (33)$$

当 $\frac{1}{4} - Q_{RS}^* - P_{RS}^2 = 0$ 时的临界负荷等值导纳的有名值为

$$g_{L,cr} + jb_{L,cr} = \frac{P_{RS} - jQ_{RS}}{\frac{V_S^2}{2} - Q_{RS} x_{SR}} \quad (34)$$

临界电压崩溃的负荷等值导纳与运行方式 V_S 、支路阻抗 x_{SR} 和负荷 P_{RS} 、 Q_{RS} 有关。显然, 当负荷的等值导纳小于临界导纳时, 支路处于高电压运行状态, 输电电流较小, 输电效率较高, 在额定电压附近正常运行时电路必处于高电压解状态。

当 $g_L > g_{L,cr}$, $b_L > b_{L,cr}$ 时, 支路处于低电压解状态, 此时, 负荷电流较大。若系统扰动中进行

了多次负荷转移,可使支路 SR 的负荷等值导纳大于临界等值导纳,该支路就可处于低电压解状态。若实际工程负荷在自动保护、调节的作用下,并不能保持大电流运行的功率特性,则低电压运行点虽然具有物理意义,但不一定有工程意义。根据式(29)、(30),可有

$$V_R = \sqrt{\frac{V_S^2}{2} - Q_{RS}x_{SR} \pm \sqrt{\frac{V_S^4}{4} - Q_{RS}x_{SR}V_S^2 - P_{RS}^2x_{SR}^2}} \quad (35)$$

$$\text{令 } A = \sqrt{\frac{V_S^4}{4} - Q_{RS}x_{SR}V_S^2 - P_{RS}^2x_{SR}^2} \quad A \text{ 存在且 } A > 0.$$

根据式(35),可有

$$\frac{\partial V_R}{\partial V_S} = \frac{V_S(1 \pm \frac{V_S^2}{2A}(1 - 2Q_{RS}^2))}{2V_R} \quad (36)$$

$$\frac{\partial V_R}{\partial P_{RS}} = \mp \frac{P_{RS}x_{SR}^2}{2V_RA} \quad (37)$$

$$\frac{\partial V_R}{\partial Q_{RS}} = -\frac{x_{SR}}{2V_R}(1 \pm \frac{V_S^2}{2A}) \quad (38)$$

V_R 的全微分为

$$\Delta V_R = \frac{\partial V_R}{\partial V_S} \Delta V_S + \frac{\partial V_R}{\partial P_{RS}} \Delta P_{RS} + \frac{\partial V_R}{\partial Q_{RS}} \Delta Q_{RS} \quad (39)$$

一般,负荷表示为 $P_R = P_R(V_R)$ 、 $Q_R = Q_R(V_R)$ 的电压静特性形式,则

$$\Delta P_R = \frac{\partial P_R}{\partial V_R} \Delta V_R \quad \Delta Q_R = \frac{\partial Q_R}{\partial V_R} \Delta V_R$$

根据功率平衡关系, ΔP_{RS} 、 ΔQ_{RS} 必须反映在负荷的变化中,则有

$$\Delta V_R = \frac{\partial V_R}{\partial V_S} \Delta V_S + \frac{\partial V_R}{\partial P_{RS}} \frac{\partial P_{RS}}{\partial V_R} \Delta V_R + \frac{\partial V_R}{\partial Q_{RS}} \frac{\partial Q_{RS}}{\partial V_R} \Delta V_R \quad (40)$$

$$\Delta V_S = \frac{1 - \frac{\partial V_R}{\partial P_{RS}} \frac{\partial P_R}{\partial V_R} - \frac{\partial V_R}{\partial Q_{RS}} \frac{\partial Q_R}{\partial V_R}}{\frac{\partial V_R}{\partial V_S}} \Delta V_R \quad (41)$$

$$\text{令 } K = \frac{1 - \frac{\partial V_R}{\partial P_{RS}} \frac{\partial P_R}{\partial V_R} - \frac{\partial V_R}{\partial Q_{RS}} \frac{\partial Q_R}{\partial V_R}}{\frac{\partial V_R}{\partial V_S}} \quad (42)$$

若根据负荷端电压 V_R 的变化,在送端进行 V_S 调节,以使受端电压 V_R 满足给定要求的控制方式,则式(41)是根据全微分关系,同时考虑输送特性和负荷特性的一种简单闭环比例控制方式。显然,当 $K > 0$ 时,可获得升高 V_S 以提高 V_R 的控制效果,反之亦然。而当 $K < 0$ 时,若 V_R 偏低需提高,如仍采用常规的提高 V_S 的控制方式,则将造成 V_R 持续下降。这说明,要稳定 V_R ,须根据运行状态所确定的 K 值,选择适当的控制方式。同时 K 值的大小,

也反映了控制的灵敏程度。

3 结论

若负荷具有 $\frac{\partial P_R}{\partial V_R} > 0$ 、 $\frac{\partial Q_R}{\partial V_R} > 0$ 的阻抗型特性,

即负荷功率随端电压的升高而增大,反之亦然。系统正常运行状态时处于高电压解运行状态, $K > 0$, 采用常规的升高送端电压 V_S 提高受端 V_R 的控制方式,就可以稳定负荷端电压。

若负荷具有 $\frac{\partial P_R}{\partial V_R} \leq 0$ 、 $\frac{\partial Q_R}{\partial V_R} \leq 0$ 的非阻抗型特性,

即负荷功率随端电压的降低反而增大,则在低电压解运行状态,可能出现 $K < 0$, 再采用常规的调压方式,将导致负荷端电压的持续下降可能出现电压失稳情形。对于此类所谓的静态不稳定运行点,采用负荷端电压偏低时,反而适当降低送端电压 V_S 的非常规调压控制方式,仍可维持负荷端电压的稳定。

电压稳定分析中,为回避功率型负荷在低电压时所导致的非线性代数方程无解的病态计算问题,稳定程序将负荷特性切换为恒阻抗型模型^[11],这样就湮灭功率型负荷对电压失稳的影响。

参考文献

- [1] Tamura Y. Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solution in Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1983, 102(5):1115-1125.
- [2] Venilov V A, Stroeve V A, Idelchick V A, et al. Estimation of Electric Power System Steady-state Stability in Load Flow Calculation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, PAS-94: 1034-1041.
- [3] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(14): 26-30.
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian, et al. Effect of Load Characteristics on Power System Steady-state Voltage Stability and the Practical Criterion of Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(14): 26-30.
- [4] Ching H D, et al. On Voltage Collapse in Electric Power Systems[J]. IEEE Trans PWRs, 1990, 5(2): 601-611.
- [5] 贾宏杰, 余贻鑫, 李鹏, 等. 电力系统混沌现象与不同失稳模式之间的关系[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 1-4.
- [6] JIA Hong-jie, YU Yi-xin, LI Peng, et al. Relationships of Power System Chaos and Instability Models[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 1-4.
- [6] 王庆红, 周双喜. 电力系统微分代数模型奇异诱导分岔分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 18-22.

(下转第 16 页 continued on page 16)

参考文献

- [1] 张志刚, 黄守道, 任光法, 等. 三相电压型 SVPWM 整流器控制策略研究[J]. 长沙大学学报, 2004.
ZHANG Zhi-gang, HUANG Shou-dao, REN Guang-fa, et al. Research on Control Strategy of the Three-phase Voltage SVPWM Rectifier[J]. Journal of Changsha University, 2004.
- [2] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. Control Strategy of PWM Rectifier[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [3] 张笑薇, 李永东, 刘军. PWM 整流器电流控制策略的研究[J]. 电工技术杂志, 2003, (12): 57-59, 68.
ZHANG Xiao-wei, LI Yong-dong, LIU Jun. Research on Current Control Strategy for PWM Rectifier[J]. Electrotechnical Journal, 2003, (12): 57-59, 68.
- [4] 黄守道, 张铁军, 陈颖, 等. 一种三相 PWM 整流器控制方法研究[J]. 电气应用, 2005, (3): 110-113.
HUANG Shou-dao, ZHANG Tie-jun, CHEN Ying, et al. Investigation of an Control Strategy for Three Phase PWM Voltage Rectifier[J]. Electric Application, 2005, (3): 110-113.
- [5] 张勋, 甘长海, 王兵, 等. PWM 整流器的电流解耦控制研究[J]. 空军雷达学院学报, 2004, (4): 33-35.
ZHANG Xun, GAN Chang-hai, WANG Bing, et al. Research of Current Decoupling Control for PWM Rectifier[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2004, (4): 33-35.
- [6] 詹长江, 康勇, 刘平, 等. 电压型 PWM 整流器统一数学模型及系统仿真[J]. 电工技术学报, 1996, (6): 60-64.
ZHAN Chang-jiang, KANG Yong, LIU Ping, et al. The Unified Mathematical Model and systematic simulation for PWM Rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, (6): 60-64.
- [7] Moran L, Zioogas P D, Joos G. Design Aspects of Synchronous PWM Rectifier-inverter Systems Under Unbalanced Input Voltage Conditions[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1992, 28(6): 1286-1293.
- [8] Vincenti D, Jin H. A Three Phase Regulated PWM Rectifier with on-line Feed-forward Input Unbalance Correction[J]. IEEE Trans Ind Electronics, 1994, 41: 526-532.
- [9] song Hong-seok, Nam Kwanghee. Dual Current Control Scheme for PWM Converter Under Unbalanced Input Voltage Conditions[J]. IEEE Trans Ind Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- 收稿日期: 2009-03-16; 修回日期: 2009-05-21
作者简介:
张宏杰(1969-), 男, 讲师, 从事继电保护、电力电子等方面的研究;
张辑(1976-), 男, 从事继电保护、电力电子等方面的研究。E-mail: 221zhangji@163.com
-
- (上接第 12 页 continued from page 12)
- WANG Qing-hong, ZHOU shuang-xi. Singularity Induced Bifurcation in Power System Differential Algebraic Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (7): 18-22.
- [7] Overbye T J. Use of Energy Methods for On-line Assessment of Power System Voltage Security[J]. IEEE Trans PWRs, 1993, 8(2): 452-457.
- [8] Overbye T J. Use of Energy Methods for On-Line Assessment of Power System Voltage Security[J]. IEEE Trans PWRs, 1993, 8(2): 452-457.
- [9] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (6): 40-45.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest bus of the Power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13 (6): 40-45.
- [10] FENG Zhi-hong, Vendantaramana Ajjaraipu. Identification of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 342-348.
- [11] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [12] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- 收稿日期: 2008-11-28; 修回日期: 2009-01-01
作者简介:
徐涛(1968-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: xutao_569@163.com
康海珍(1971-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统控制与继电保护;
张振程(1966-), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度工作。