

用电路分析法研究电力系统潮流可行域

徐涛¹, 康海珍¹, 张振程², 丁美¹

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

摘要: 电力系统动态行为可归结为非线性微分-代数方程组, 其中微分方程描述控制过程, 而非线性代数方程是电力系统的潮流方程描述控制过程的运行点。潮流可行域的分析关键在于如何获取潮流解的临界边界, 它涉及全面求解高维非线性代数方程所面临的数学难题, 但非线性代数方程是稳态交流电路方程, 是电网的综合描述, 满足电路运行规律。从简单交流电路支路特性分析入手, 提出了用电路理论确定电力系统潮流可行域的方法, 以 IEEE5 节点系统作为潮流可行域的算例, 并在 $R_p \cdot OR_Q$ 平面上对算例电阻不为零的支路进行了潮流可行域的初步描述。

关键词: 电力系统; 交流电路; 电路特性; 潮流; 可行域

Study of power flow feasible region by electric circuit analysis method

XU Tao¹, KANG Hai-zhen¹, ZHANG Zhen-cheng², DING Mei¹

(1. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;
2. Eerduosi Kangbasha Power Supply Company, Eerduosi 017000, China)

Abstract: Dynamic behavior of electric power system is generalized a set of nonlinear differential and algebraic equations. The former presents the course of control. The later presents the controlling course of running node and discusses the problem for power flow. The key to analysis of power flow feasible region is how to gain the critical boundary for power flow solves, but it refers to the difficulties in mathematics to solve the high dimension nonlinear equations. Being a steady-state operating alternating current circuit (ACC) and a synthetic description about power network, the nonlinear equation satisfies ACC rules. By analyzing the simple alternating-current circuit, a determination of power flow feasible region method is given. It takes the IEEE5 node system as arithmetic example and describes power flow feasible region on the $R_p \cdot OR_Q$ plane for the branches whose resistance is not equal to zero.

Key words: electrical power system; alternating current circuit; electric circuit characteristics; power flow; feasible region

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0005-05

0 引言

所谓潮流问题的可行域^[1], 是指在给定的系统结构及其参数和节点类型F下, 如果有一组确定的注入向量 Y_S (包括潮流方程的PQ节点的有功和无功功率的注入, PV节点的有功注入和电压幅值, 以及平衡节点的电压), 使得系统状态变量X (由节点电压构成) 有实数解, 则称 Y_S 相对于F是可行的, 使 $Y_S=F(x)$ 有实数解的注入向量 Y_S 的集合就称为潮流问题的可行解域, 表示为:

$$R_Y = \{Y_S | Y_S = F(X), X \in R^n\} \quad (1)$$

可行域边界由对应于边界注入向量的雅可比矩阵 $J(X)$ 奇异求得, 即对于任意母线的边界注入向

量 Y_{sb} 有:

$$|J(X_b)| = 0 \quad (X_b \text{ 是对应于 } Y_{sb} \text{ 母线电压}) \quad (2)$$

对应于边界注入向量 Y_{sb} 的潮流解是唯一的。

在域的范畴内, 潮流可行域一直是一个重要的研究对象, 因为通常潮流可行域的问题与系统静态电压稳定性密切相关, 可行域是建立在 R^{2n} 上的, 而实际系统中的节点数目 n 通常很大(成百上千或更大), 故难以描述和使用, 文献[2]指出“在数学领域中还没有关于非线性代数方程解的个数的理论, 也没有计算多解的有效算法”的数学困难。为此文献[3]初步探讨了如何实现大型电力系统可行域的降维及可视化问题。目前研究主要以非线性控制系统理论为基础的灾变^[4]、混沌^[5]、分岔^[6]及能量函数法^[7]等为主, 以上各类分析法互为补充。而突出物

理概念的最大功率法^[8]以电路理论为基础, 本文也作类似尝试。

1 交流电路支路运行特性

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两端节点考虑), 取 S、R 端的电压为 \dot{V}_S 、 \dot{V}_R , 支路电流为 \dot{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} 。

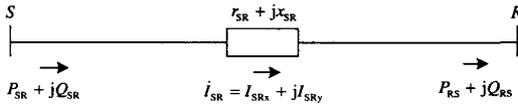


图 1 简单交流电路

Fig.1 A simple alternating current circuit

图 1 电路的支路电压方程为:

$$\dot{V}_R = \dot{V}_S - \dot{I}_{SR}(r_{SR} + jx_{SR}) \quad (3)$$

将受端电压按实部和虚部分开列写为:

$$V_{Rx} = V_{Sx} - (I_{SRx}r_{SR} - I_{SRy}x_{SR}) \quad (4)$$

$$V_{Ry} = V_{Sy} - (I_{SRx}x_{SR} + I_{SRy}r_{SR}) \quad (5)$$

图 1 电路受端的输出功率为:

$$P_{RS} + jQ_{RS} = \dot{V}_R \dot{I}_{SR}^* \quad (6)$$

$$P_{RS} = V_{Sx}I_{SRx} + V_{Sy}I_{SRy} - (I_{SRx}^2 + I_{SRy}^2)r_{SR} \quad (7)$$

$$Q_{RS} = V_{Sy}I_{SRx} - V_{Sx}I_{SRy} - (I_{SRx}^2 + I_{SRy}^2)x_{SR} \quad (8)$$

将式 (7)、(8) 联立二元二次方程组转化为圆的标准形式, 其标准形式的方程如下式:

$$\left(I_{SRx} - \frac{V_{Sx}}{2r_{SR}} \right)^2 + \left(I_{SRy} - \frac{V_{Sy}}{2r_{SR}} \right)^2 = \frac{V_S^2}{4r_{SR}^2} - \frac{P_{RS}}{r_{SR}} \quad (9)$$

$$\left(I_{SRx} - \frac{V_{Sy}}{2x_{SR}} \right)^2 + \left(I_{SRy} + \frac{V_{Sx}}{2x_{SR}} \right)^2 = \frac{V_S^2}{4x_{SR}^2} - \frac{Q_{RS}}{x_{SR}} \quad (10)$$

以 I_{SRx} 、 I_{SRy} 为变量, 式(9)表示的圆称为 C_P , 其半径为 R_P , 式(10)表示的圆称为 C_Q , 其半径为 R_Q 。两圆的圆心 O_P 、 O_Q 的坐标分别为:

$$O_P: \left(\frac{V_S \cos \delta_S}{2r_{SR}}, \frac{V_S \sin \delta_S}{2r_{SR}} \right) \quad (11)$$

$$O_Q: \left(\frac{V_S \sin \delta_S}{2x_{SR}}, -\frac{V_S \cos \delta_S}{2x_{SR}} \right) \quad (12)$$

两圆的半径以及两圆心的距离 D 分别为:

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

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

$$D = \sqrt{\frac{V_S^2}{4r_{SR}^2} + \frac{V_S^2}{4x_{SR}^2}} \quad (15)$$

2 潮流可行域的研究

式 (9)、(10) 有解的条件为两圆半径大于或等于零且两圆相交或相切。当两圆相交时, 两交点如图 2 中的 P_1 、 P_2 所示, 则在同一负荷 P_{RS} 、 Q_{RS} 下, 图 1 电路存在两个运行点。

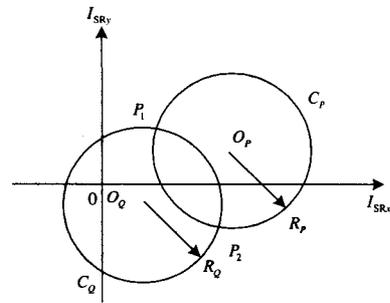


图 2 两圆相交

Fig.2 Two circulars are intersecting

由式 (13)、(14) 知, 受端负荷增加 R_P 、 R_Q 将缩小相反则增大。当负荷增加或减少时, 若有功负荷不变无功负荷持续增加 (或减少)、无功负荷不变有功负荷持续增加 (或减少)、有功和无功负荷同时持续变化 (增加或减少) 或有功、无功负荷向彼此之间的负荷增减的相反方向持续变化时, 负荷的这种变化势必会导致有功、无功圆半径 R_P 、 R_Q 产生相应的持续增大、减小变化。这个变化过程不是随意的, 一定受交流电路运行的规律所约束。就复杂系统中的任一简单交流支路而言, 若有功、无功负荷持续变化导致产生如图 3、4、5 所示的有功圆、无功圆相切于一点 P_0 的情形时, 则方程 (9)、(10) 有唯一解, 电路存在唯一运行点。若此时负荷发生微小增减扰动, 均可能引起两圆无交点, 则方程 (9)、(10) 无解, 即使图 3、4、5 电路的功率输送特性与负荷功率特性不相容, 电路将无法正常运行, 负荷必将失去原来的工作特性, 不再落入潮流可行域中, 使得潮流无解。所以, P_0 点的交流电路运行方式是一种允许负荷电流、电压在符合物理规律的定义域内高自由度变化情况下可能的极端运行方式, 称之为潮流可行域边界上的临界运行点。

对应于图 3 的极端运行方式, 式 (9)、(10) 有解的条件是: $R_P + R_Q \geq D$ 对应于图 4 的极端运行方

式, 式 (9)、(10) 有解的条件是: $R_Q - R_P \leq D$ 对应于图 5 的极端运行方式, 式 (9)、(10) 有解的条件是: $R_P - R_Q \geq D$ 。以 D 为基准值, 将式 (9)、(10) 有解的条件化为标么值, 则可以将问题转换到 $R_P \cdot OR_Q$ 坐标系统中讨论:

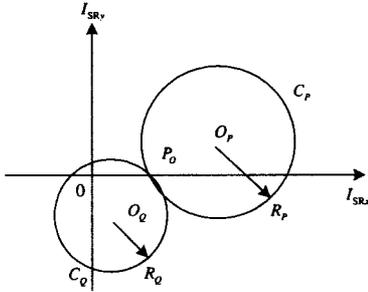


图 3 两圆相切

Fig.3 Two circulars are tangent

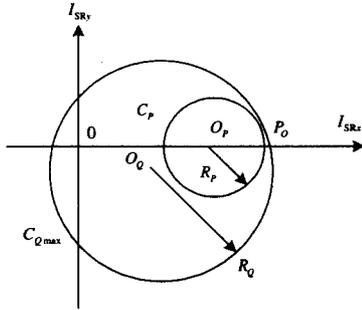


图 4 两圆相切

Fig.4 Two circulars are tangent

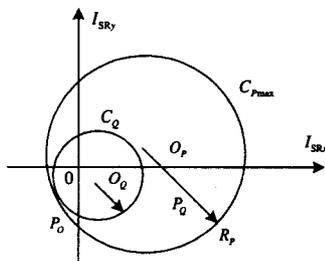


图 5 两圆相切

Fig.5 Two circulars are tangent

支路电阻 $r \neq 0$ 时, 以有功圆和无功圆的圆心距 D 为基准值用标么值表示的使方程组 (9)、(10) 有解的条件为:

$$R_{P*} \geq 0, R_{Q*} \geq 0, R_{P*} + R_{Q*} \geq 1, R_{Q*} - R_{P*} \leq 1, R_{P*} - R_{Q*} \leq 1$$

支路电阻 $r=0$ 时, 方程式 (9) 变为:

$$V_{Sx} I_{SRx} + V_{Sy} I_{SRy} - P_{RS} = 0 \quad (16)$$

给定负荷的正常运行方式下有功直线 L 与无功圆 C_Q 有两个交点分别为 P_1 、 P_2 , 如图 6 所示, 是支路的两个运行点。当负荷以任何方式变动引起无功圆 C_Q 的半径变化或是引起有功直线 L 在坐标轴 I_{SRx} 、 I_{SRy} 上截距发生变化时, 引起二者相切于 P_0 时有 $R_Q=d$, 则该支路处于潮流临界状态如图 7 所示, 图 6、图 7 中 d 为无功圆心到有功直线 L 的距离, P_0 点为临界点。

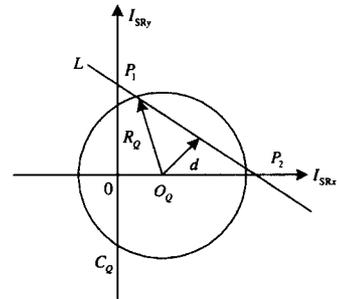


图 6 直线和圆相交

Fig.6 A circular is intersecting on a line

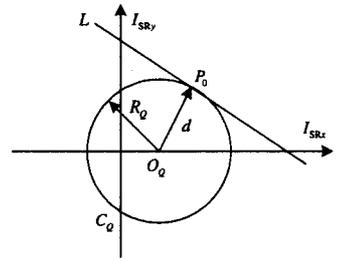


图 7 直线和圆相切

Fig.7 A circular is tangent on a line

于是支路正常运行的条件为: $R_Q/d \geq 1$, 其中支路在 $R_Q/d=1$ 时潮流处于临界状态。以 R_P 为横轴、 R_Q 为纵轴、 O 为圆心建立 $R_P \cdot OR_Q$ 平面, 将系统的运行情况转换到 $R_P \cdot OR_Q$ 平面内进行讨论, 在此平面内系统每一条支路都有正常运行点 (R_P, R_Q) , 所有使方程组 (9)、(10) 有解的运行点集合组成的连续区域便是系统的潮流可行域, 可表示为:

$$\Omega_{\text{flow}} = \left\{ (R_P, R_Q) \left| \begin{array}{l} R_P \geq 0, R_Q \geq 0, R_P + R_Q \geq 1, \\ R_Q - R_P \leq 1, R_P - R_Q \leq 1, \\ R_Q/d \geq 1 \end{array} \right. \right\} \quad (17)$$

其边界为:

$$\Omega_{dynamic} = \left\{ (R_{P^*}, R_{Q^*}) \left| \begin{array}{l} R_{P^*} \geq 0, R_{Q^*} \geq 0, R_{P^*} + R_{Q^*} = 1, \\ R_{P^*} - R_{Q^*} = 1, R_{Q^*} - R_{P^*} = 1, \\ R_Q/d = 1 \end{array} \right. \right\} \quad (18)$$

3 算例分析 (图 8)

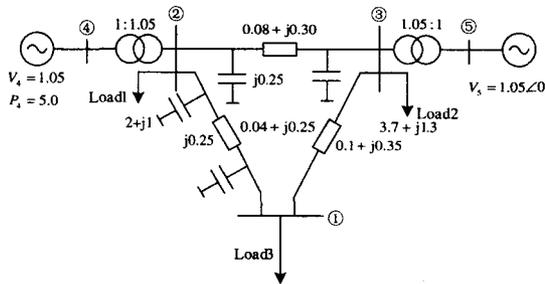


图 8 IEEE5 节点系统
Fig.8 IEEE5 bus system

为测试该算法, 编制了数值计算分析程序, 对 IEEE5 节点系统的正常运行和一条支路达到潮流临界运行状态的系统进行验证, 以判断受测系统是否运行在可行域内。支路 1 处于潮流临界运行状态下的系统参数由电力系统临界电压崩溃潮流的柔性节点算法^[9]获得。计算结果列于表 1 和 2 中。

表 1 IEEE5 节点系统处于正常运行时的潮流可行域分析
Tab.1 Analysis of power flow feasible region for IEEE5 bus system in normal running

支路	R_P	R_{Q^*}	$R_{P^*}+R_{Q^*}$	$R_{P^*}-R_{Q^*}$	$R_{Q^*}-R_{P^*}$	d/R_q
1	0.882 1	0.142 0	1.024 2	0.740 1	-0.740 1	
2	0.937 3	0.192 4	1.129 7	0.744 9	-0.744 9	
3	0.777 9	0.314 2	1.092 1	0.463 7	-0.463 7	
4						0.141 7
5						0.159 4

对于正常运行系统, 由表 1 可见系统各支路运行点均在潮流可行域内, 整个系统处于正常稳定运行状态, 各条支路的有功圆、无功圆半径以及圆心距离与半径的关系均在可行域范围之内。

对于系统一条支路达到潮流临界状态的系统由表 2 可见 IEEE5 节点系统第 1 条支路有、无功半径之和 $R_P+R_Q=1.000 0$, 该支路在此运行方式下已经处于两功率圆的外切边界上。此时该支路输出到节点 1 端的功率 $P_{RS}=1.297 6$, $Q_{RS}=0.593 3$, 有功圆半径 $R_P=11.968 4$, 无功圆半径 $R_Q=1.454 7$, 两圆心距 $D=13.423 1$, 有功圆、无功圆处于外切状态。

将计算结果中电阻不为零的支路用 Matlab6.5

编程在 $R_P \cdot OR_Q$ 平面上绘制二维图形, 初步在该平面实现潮流可行域的描述。显然, 图 9 中 5 节点系统正常运行时可行域内支路 1 的运行点距离边界 $R_P+R_Q=1$ 的距离最近, 图 10 中 5 节点系统处于潮流临界运行状态运行时可行域内支路 1 的运行点已经运行至边界 $R_P+R_Q=1$ 上, 系统已经处于潮流临界运行状态。

表 2 IEEE5 节点系统临界运行状态时的潮流可行域分析
Tab.2 Analysis of power flow feasible region for IEEE5 bus system in critical running

支路	R_P	R_{Q^*}	$R_{P^*}+R_{Q^*}$	$R_{P^*}-R_{Q^*}$	$R_{Q^*}-R_{P^*}$	d/R_q
1	0.891 6	0.108 4	1.000 0	0.783 3	-0.783 3	
2	0.903 1	0.109 5	1.012 6	0.793 6	-0.793 6	
3	0.763 3	0.319 3	1.082 6	0.444 0	-0.444 0	
4						0.146 5
5						0.181 0

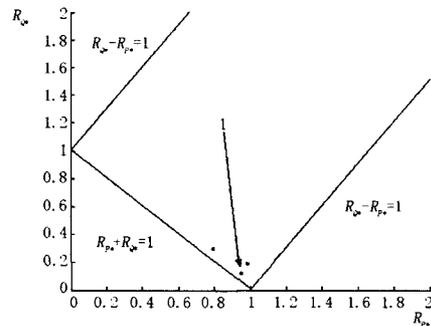


图 9 IEEE5 节点系统正常运行潮流可行域图形描述
Fig.9 Graph depict of power flow feasible region for IEEE5 bus system in normal running

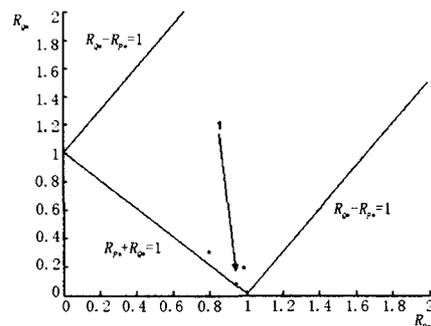


图 10 IEEE5 节点系统状态下的潮流可行域图形描述
Fig.10 Depict of power flow feasible region for IEEE5 bus system in critical running

4 结论

现阶段, 与静态电压稳定问题密切联系的潮流

可行域的研究水平仍然处于探索阶段,有必要进行更加广泛的研究和探讨。

本文是在总结前人研究成果基础上,借鉴突出物理概念的最大功率法,立足电路理论,将问题转移在 $R_p \cdot OR_Q$ 平面上。运用支路电压方程分析潮流可行域边界,规避了研究电力系统可行域时所面对的高维注入变量空间难以描述以及降维的困难。该方法电路物理概念明确,对于给定的运行方式只要判断其所有支路是否符合落入可行域的条件,从而判断潮流是否有解。

参考文献

- [1] 周双喜,朱凌志,等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京:中国电力出版社,2003.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, et al. Power System Voltage Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] 徐泰山,薛禹胜,韩祯. 祥关于电力系统电压稳定分析方法的综述[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 62-67.
XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang. A Survey on Voltage Stability Analysis Methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 62-67.
- [3] 曾沅,樊纪超,余贻鑫. 电力系统动态安全域实用解法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 23(5): 24-28.
ZENG Yuan, FAN Ji-chao, YU Yi-xin. Practical Solve Method for Dynamic Security Region in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 23(5): 24-28.
- [4] C 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.
JIA Hong-jie, YU Yi-xing, 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.
WANG Qin-hong, ZHOU Shuang-xi. Singularity Induced Bifurcation in Power System Differential Algebraic Mode [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 PWERS, 1993, 8(2): 452-457.
- [8] Ajjaraau V, Christy C. The Continuation Power Flow: a Tool for Stability State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 7(1): 416-423.
- [9] 杭乃善,廖青华,李如琦,等. 电力系统临界电压崩溃潮的柔性节点算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 57-61.
HANG Nai-shan, LIAO Qing-hua, LI Ru-qi, et al. A Flexible Node Algorithm for Critical Voltage Collapse Power Flow in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 57-61.

收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2008-11-09

作者简介:

徐涛(1968-),男,硕士研究生,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继电保护;

张振程(1966-),男,工程师,主要从事专业电力系统调度工作。

许继电气: 成为国网直系公司 未来发展可期

许继集团以剥离非主业资产后的净资产评估值为基础进行增资,中国电科院以重庆渝能泰山电线电缆有限公司100%的股权、重庆顺泰铁塔制造有限公司100%的股权等资产认缴,本次增资完成后,中国电科院、平安信托分别持有许继集团60%、40%的股权。

平安信托将所持许继集团40%的股权转让给中国电科院,中国电科院将持有许继集团100%的股权;中国电科院通过许继集团将许继集团所持部分许继的股份转让给平安信托。转让后将保持许继集团对许继电气的控股地位,中国电科院将成为许继集团的控股股东,也是许继电气的控股股东。中国电科院是国家电网公司直属科研单位,目前拥有二十个研究所、六个科技公司,计划打造百亿电气产业。国网直属的电科院对公司控股,对于公司在技术实力及资产整合上有更大裨益,双方在部分产品上存在一定竞争行为,预计电科院将对双方资产进一步整合。平安信托成为参股股东,在资金上对公司进行无息贷款支持。