

交直流混合系统负荷功率裕度分析

张 尧¹,张建设¹,武志刚¹,张志朝^{1,2}

(1.华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640;

2.中国南方电网超高压输电公司广州局,广东 广州 510405)

摘要: 定义了区域有功负荷裕度指标,运用该指标研究了给定负荷增长方式下 2005 年广东实际交直流电网的静态电压稳定状况,结果表明,珠江三角洲重负荷区域、粤东地区负荷裕度小,是静态电压稳定薄弱区域。针对给定负荷增长方式确定系统负荷功率极限结果偏乐观的缺陷,提出了交直流混合系统最临近负荷功率极限算法,采用交直流潮流交替迭代方法,同时可计及稳态时直流不同控制方式和换流站无功补偿对功率裕度的影响。算例分析表明,该算法能方便地计算交直流混合系统在最恶化负荷增长方向下的负荷功率裕度。

关键词: 交直流混合系统; 静态电压稳定; 区域负荷裕度; 弱区域; 最临近负荷功率极限点

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)09-0001-04

0 引言

南方电网是目前世界上规模最大且最复杂的交直流并联电网,大量电力从云南、贵州和华中地区通过“五交三直”的长距离输电通道送至负荷中心广东。广东约占南方电网负荷总量的 60 %^[1],其 80 % 的负荷又集中在珠江三角洲地区;重负荷中心容易因为抵御负荷增长能力弱而发生静态电压失稳。因此,寻求合适指标判断受端系统抵御负荷增长的能力,同时揭示电网电压稳定薄弱区域,一直是运行调度人员十分关注的问题。

现有《电力系统安全稳定导则》规定以电压水平作为静稳安全指标^[2],保持电压在用户工作点的容许范围内对系统安全而言是必要的,但不一定是充分的,因为一个系统可能已经进入了电压不稳定状态,但其电压可能仍处于或接近额定水平^[2,3]。而且,电压指标不具线性的特点,不利于运行人员监控^[4,5]。针对电压指标存在的缺陷,本文首先运用负荷裕度判别法并利用成熟的电力系统电压安全评估软件 VSAT(Voltage Security Assessment Tool),得出了适合快速分析交直流混合系统静态电压稳定性的估算指标,运行人员利用该指标可确定典型功率增长方式下广东电网负荷功率裕度,对系统当前运行状态抵御负荷变化的安全程度以及电压稳定的薄弱区域有定量的认识。

采取类似以上给定负荷增长方式确定负荷功率极限的做法,本文称为传统方式。采用传统方式确定负荷功率极限的结果往往偏于乐观,不能保证是

在所有增长方式下的最临近负荷功率极限点。本文第 2 部分即考虑系统所有的负荷增长模式,计算距离系统当前运行点最小的功率裕度以及系统负荷最恶化的增长方向,能够更严格地评估系统的稳定性,并且计算系统在最临近负荷功率极限点处的最优控制方向,可得到采取何种措施才能更有效地提高交直流混合系统的安全裕度。

1 负荷裕度判别法

1.1 基本原理

由系统当前运行状态通过增加负荷功率逐步逼近负荷临界功率点,则系统当前运行点到临界功率点的距离可作为静态电压稳定性程度的指标,称为负荷裕度指标。负荷裕度是最基本的、被广泛接受的电压稳定性指标^[4]。基于负荷裕度判别法的静态电压稳定分析计算量小,在一定程度上能较好地反映系统的电压稳定水平,并可给出系统的电压稳定裕度,便于监视和优化调整,对电力系统运行调度部门具有极其重要的实用意义^[5]。

定义区域有功负荷裕度指标 RLMI (Regional Load Margin Index),用 I_{RLM} 表示:

$$I_{RLM} = \frac{\Delta P}{P_{cr}} \times 100 \% = \frac{P_{cr} - P_0}{P_{cr}} \times 100 \% \quad (1)$$

式中 P_0 和 P_{cr} 分别为所研究区域的当前状态和临界状态的有功负荷功率。

由于计算裕度指标总是基于当前稳态潮流,因此: $I_{RLM} \geq 0$ 。且有对应关系: $I_{RLM} > 0$, 系统静态电压稳定; $I_{RLM} = 0$, 临界稳定。某区域 I_{RLM} 越小,说明该区域当前工作点距离稳定极限点相对越近,所承受负荷功率变化的能力越差,应该成为运行人员重点监视的关键负荷区域。

收稿日期: 2005-07-15

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50337010); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020561004)

本文选取 I_{RLM} 作为静态电压安全性指标,该指标物理概念清晰直观,具有线性特点易于监测,且能根据指标大小快速准确地确定大电网系统负荷区域电压强弱程度。

1.2 广东电网负荷裕度分析

由于系统当前运行状态逼近负荷临界功率点的过渡过程对 I_{RLM} 的计算结果有影响,不同的过渡过程计算的 I_{RLM} 可能不同。本文按区域负荷裕度判别法确定负荷增长方式,即广东电网同一地、市区域内全部负荷等功率因数增长,而其他省份、区域的负荷保持不变;发电机出力分配方式考虑严重情况,即由西电东送功率送端云南和贵州旋转备用发电机组增加出力分担广东区域负荷的增加,若某台机组出力超出额定值,其超出部分由本省的其他机组承担^{[6]①}。在云南和贵州具有旋转备用的发电机组中,云南占 54.4%,贵州占 45.6%,按此比例确定云南和贵州机组增加出力的份额。

按上述典型的过渡过程,采用逐步加重系统潮流的方法,并顾及发电机的有功和无功出力极限限制^①,使用 VSAT 软件计算出 2005 年丰大方式下广东电网区域负荷功率极限和 I_{RLM} ,如表 1 所示, I_{RLM} 从小到大排序。

表 1 广东电网 I_{RLM} 和区域电压强弱程度
Tab.1 I_{RLM} and weak voltage stability regions of Guangdong power grid

广东分区分电网	基准有功负荷 / MW	有功负荷极限 / MW	$I_{RLM} / \%$	区域电压强弱程度
汕头	1 200	1 307.5	8.22	弱区域
深圳	4 668	5 280.5	11.60	
东莞	4 710	5 362.5	12.17	
揭阳	611	706.0	13.46	
潮州	570	660.0	13.64	
广州	5 259	6 318.2	16.76	较弱区域
佛山	3 867	4 672.0	17.23	
惠州	1 349	1 679.0	19.65	
汕尾	251	351.0	28.49	
珠海	980	1 532.5	36.05	
江门	1 629	2 579.0	36.84	较强区域
阳江	350	560.0	37.50	
中山	1 350	2 192.5	38.43	
肇庆	420	7 07.5	40.64	
茂名	625	1 187.5	47.37	
云浮	150	300.0	50.00	强区域
韶关	370	805.0	54.04	
湛江	439	984.0	55.38	
梅州	110	277.5	60.36	
清远	120	487.5	75.38	
河源	40	335.0	88.06	

从表 1 可以看出以下几点。

a. 珠江三角洲的重负荷区域(深圳、东莞)以及粤东地区(汕头、揭阳和潮州) I_{RLM} 均小于 15%,汕头地区的 I_{RLM} 甚至小于 10%。这些地区抵御负荷变化的能力弱,是静态电压稳定的薄弱区域,需要运行人员重点监视。

b. 负荷较重的粤中地区(广州、佛山)以及粤东的惠州、汕尾地区, I_{RLM} 均小于 30%,属于较薄弱地区,也需要运行人员监视负荷变化趋势。尤其是广州地区负荷基数大,该地区的负荷增长易受送端发电机组有功出力极限的限制。

c. 广东电网的其他地区 I_{RLM} 较大,抵御负荷增长的能力较强,属于电压稳定强区域,从静态角度讲,这些地区电压失稳的可能性不大。

2 最临近负荷功率极限算法

2.1 问题的提出

交直流混合输电系统在大大提高系统稳定性和潮流断面的输送容量极限的同时,也带来了一些特殊问题,研究评价混合系统稳定性的指标具有很大的现实意义。然而采用常规连续潮流法,通过给定负荷增长方式计算得到的负荷功率极限点不能保证是最临近的负荷功率极限点 CCLP(the Closest Critical Load Point)。因此,采用传统方式计算出来的结果都偏乐观。

可以看出,在传统方式的基础上充分考虑直流系统影响(如不同直流控制方式、换流站无功补偿等)计算 CCLP 是完全必要的。通过计算 CCLP,能够在系统崩溃曲面上找出距离系统当前运行点最近的功率极限点,判断出当前负荷状态下最小的功率裕度以及最恶化的负荷功率增长方向,进而研究提高交直流混合系统负荷功率裕度,从而使系统远离崩溃边界的措施,以提高混合系统的稳定性。

2.2 具体算法

所提 CCLP 算法首先解决了如何搜索最恶化负荷功率增长方向的问题,搜索过程如图 1 所示。

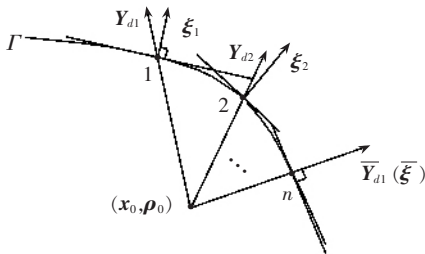


图 1 迭代法求解 CCLP 和最恶化负荷增长方向
Fig.1 Searching for CCLP and the worst load increase direction using iteration method

求解步骤如下^[7]:

a. 求解系统在正常工作条件下的潮流解,获得当前的运行点 (x_0, ρ_0) ;

b. 给定初始负荷增长方向 Y_d ,并将 Y_d 规格化,即 $|Y_d|=1$;

c. 沿给定的负荷增长方向,利用连续潮流法求取电压崩溃边界曲面 Γ 上的功率极限点;

① Powertech Labs Inc.. VSAT Version 2.0 users manual,2002.

d. 求取电压崩溃边界曲面 Γ 上当前极限点处与零特征值对应的左特征向量 ω ,并求出曲面 Γ 上当前点处的法线方向 ξ ;

e. 令 $|\xi|=1$,修正 ξ 中对应联络节点的元素为零,并将 ξ 作为新的负荷增长方向;

f. 重复步骤 c~e,直到前后两次得出的 ξ 之差满足精度为止,此时的法线方向为系统负荷的最临近增长方向 $\bar{\xi}$,系统达到最临近负荷功率极限点,且 $\rho^*=\rho_0+\lambda_*\bar{\xi}$, λ_* 为系统的最小负荷功率裕度。

采用迭代法搜索 CCLP 和最恶化的负荷增长方向明显的优点是能够保证收敛到局部最小解,且操作方便,编程容易实现。

其次,所提 CCLP 算法解决了交直流系统相互影响的问题。算法采用交替迭代法计算交直流混合系统潮流,实际上将直流系统等效为一个可以变化的“负荷”(整流侧相当于交流系统的负载,逆变侧相当于注入交流系统的出力),这样即可在传统交流系统潮流计算方法的基础上考虑直流部分。求解直流等效“负荷”时,将交流潮流计算得到的换流母线电压作为直流系统的准稳态方程计算用的换相电压,交直流交替求解,直至收敛。

需要指出,本文 CCLP 算法是通过逐渐增大系统负荷求取交直流混合系统 CCLP。然而,系统负荷变化引起的换流母线电压变化容易引起直流系统变量越限,为此计算中需考虑换流变压器变比的调节和直流系统运行方式的合理调整,使直流系统变量始终保持在允许范围内。因此,该算法可考虑稳态时直流系统运行方式的合理调整以及换流站无功补偿对 CCLP 的影响,编程容易实现。

2.3 算例分析

算例系统接线图如图 2 所示,图中各元件参数见参考文献[7]。

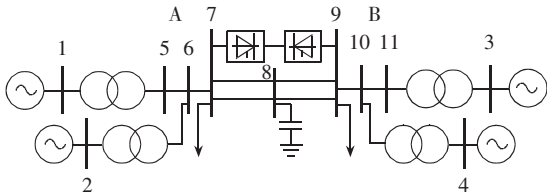


图 2 4 机两区域交直流混合系统

Figure 2 AC/DC hybrid four-machine-two-area system

由于该算例系统仅有编号 7 和 9 两个负荷节点,故采用上节介绍的 I_{RLM} 指标的必要性不大。本例中两负荷节点初始负荷增长方向按等功率因数增长方式,负荷增加引起的功率缺额由平衡机承担,不考虑发电机无功越限。

潮流计算可考虑受稳态时直流不同控制方式的约束,如整流侧定功率、逆变侧定熄弧角($P-\gamma$)方式和整流侧定电流、逆变侧定熄弧角($I-\gamma$)方式。分别考虑 $P-\gamma$ 、 $I-\gamma$ 方式,利用 CCLP 算法计算得到算例系统的最临近负荷功率裕度分别如表 2、表 3 所示。

表 2 $P-\gamma$ 控制方式时最临近功率裕度
Tab.2 The CCLP of test system under $P-\gamma$ control mode

迭代次数	λ_*
0	7.345 863 474 966 65
1	6.647 295 740 017 96
2	6.634 769 226 769 71

表 3 $I-\gamma$ 控制方式时最临近功率裕度
Tab.3 The CCLP of test system under $I-\gamma$ control mode

迭代次数	λ_*
0	7.348 486 303 207 02
1	6.654 293 582 650 91
2	6.637 595 147 626 46
3	6.636 749 619 076 27
4	6.636 627 213 087 10
5	6.636 596 693 818 54
6	6.636 588 225 282 35
7	6.636 585 852 772 25
8	6.636 585 190 049 69

其中,功率裕度 λ_* 表示相对于初始负荷的负荷增加倍数。

由表 2、表 3 可知,如果负荷沿最恶化增长方向增长,交直流混合系统的功率裕度要比给定负荷增长方式下的功率裕度小得多;稳态时直流系统 $P-\gamma$ 控制方式比 $I-\gamma$ 控制方式所得的初始功率裕度和最临近的功率裕度要小。

在逆变侧换流站增加无功补偿,能够增强换流母线的抗干扰能力,提高系统的稳定极限。 $P-\gamma$ 控制方式下在逆变站并联导纳为 $j1.0$ p.u. 的电容器补偿时,采用 CCLP 算法计算得到初始功率裕度和最临近功率裕度,如表 4 所示。

表 4 $P-\gamma$ 控制方式下逆变站增加导纳
1.0p.u.时最临近功率裕度

Tab.4 The CCLP of test system under $P-\gamma$ control mode with $j1.0$ capacitor compensation installed in the invert

迭代次数	λ_*
0	7.464 334 666 499 17
1	6.809 900 406 895 83
2	6.797 537 568 835 30

由表 4 可知,在逆变站增加无功补偿能够提高交直流混合系统 CCLP 的大小。

3 结论

a. I_{RLM} 指标物理概念清晰直观,易于监测,同时能根据指标大小确定负荷区域电压稳定强弱程度;将极限状态的节点电压或电压裕度作为电压稳定安全指标是欠妥当的, I_{RLM} 指标更能反映系统电压临界状态的实际情况,适宜作为静态电压稳定的安全指标。

b. 珠江三角洲重负荷区域(深圳、东莞)以及粤东地区(汕头、揭阳和潮州)是广东电网的静态电压

稳定薄弱区域,需要运行人员重点监视;负荷较重的粤中(广州、佛山)、粤东(惠州、汕尾)属于较薄弱地区,也需要运行人员监视该区域的负荷变化;广东其他区域属于电压稳定强区域,从静态角度讲,这些地区电压失稳的可能性不大。

c. 交直流混合系统最临近负荷功率极限算法克服了给定负荷增长方式确定 CCLP 偏乐观的缺陷,可方便地计算出交直流混合系统在最恶化负荷增长方向下的功率裕度。

d. 本文算法编程灵活,可模拟稳态时直流不同控制方式和换流站无功补偿对 CCLP 的影响;直流系统 $P-\gamma$ 控制方式比 $I-\gamma$ 控制方式所得的初始功率裕度和最临近的功率裕度要小;在逆变电站增加无功补偿能够提高交直流混合系统 CCLP 的大小。

参考文献:

- [1] 毛晓明,吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术,2004,28(2):6-9,13.
MAO Xiao-ming, WU Xiao-chen. Analysis on operational problems in South China AC-DC hybrid grid[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(2): 6-9, 13.
- [2] 赵遵廉,舒印彪,郭国川. 《电力系统安全稳定导则》学习与辅导[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [3] 余贻鑫,王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [4] 周双喜,姜勇,朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术,2001,25(1):1-7.
ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems

[J]. **Power System Technology**, 2001, 25(1): 1-7.

- [5] 张尧. 电力系统静态电压稳定性与电压稳定控制的研究[D]. 天津:天津大学,1993.
ZHANG Yao. Study of static voltage stability and control of power system[D]. Tianjin: Tianjin University, 1993.
- [6] 管秀鹏,孙元章,赵国梁,等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究[J]. 电网技术,2004,28(2):1-5.
GUAN Xiu-peng, SUN Yuan-zhang, ZHAO Guo-liang, et al. Research on transient power transfer limit of power transmission from West China to East China via South China electric power grid[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(2): 1-5.
- [7] 张志朝. 电力系统最临近功率极限点电压稳定分析[D]. 广州:华南理工大学,2005.
ZHANG Zhi-chao. Voltage stability analysis by the calculation of power system closest critical point[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

张尧(1948-),男,广东廉江人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统电压稳定性、电网规划、电力市场等方面的研究工作;

张建设(1979-),男,河南商丘人,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性、交直流电力系统仿真计算分析(E-mail: epzhang@163.com);

武志刚(1975-),男,吉林吉林人,副教授,博士,研究方向为电力系统运行与稳定;

张志朝(1980-),男,河北保定人,硕士,研究方向为电力系统电压稳定分析。

Research on load margin of AC/DC hybrid power grid

ZHANG Yao¹, ZHANG Jian-she¹, WU Zhi-gang¹, ZHANG Zhi-chao^{1,2}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou EHV Bureau, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510405, China)

Abstract: The regional load margin index (I_{RLM}) is defined, with which the static voltage stability of Guangdong AC/DC hybrid power grid in 2005 is studied. The research results show that the heavy load regions of the Pearl River Delta and the eastern regions of Guangdong power grid have small load margin, which are the weak regions of static voltage stability. Because the load margin calculated by the given load increase is overestimated, CCLP (the Closest-Critical-Load-Point) algorithm is proposed. Alternate iteration of AC/DC power flow calculations is applied and the influence of different HVDC stable control modes and reactive power compensation in the converts on load margin are considered at the same time. The test results show that the closest critical load margin can be easily calculated using CCLP algorithm.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (50337010) and Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Higher Education (20020561004).

Key words: AC/DC hybrid power grid; static voltage stability; regional load margin; weak regions; closest critical load point