

广东电网失稳因素研究新视角与实用方法

徐蔚^{1,✉}, 郭知非², 姚文峰²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510080; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 目前, 广东电网采用的大电网安全稳定分析思路与方法能较好满足生产运行实际需求, 但也存在一定不足, 无法站在全局角度简单有效的厘清诸多因素对系统安全稳定的影响, 无法快捷甄别系统失稳主导因素。[方法] 在此背景下, 按“有无对比”的思路, 通过逐个“隔离”影响因素的方法来研究各因素对系统稳定的影响, 并提出了具体实现方法。[结果] 采用提出的新方法对珠三角电网电压失稳问题进行了研究, 分析结果表明马达负荷与常规直流的暂态特性对系统稳定均具有重大影响, 马达负荷对系统稳定性更具基础性作用, 常规直流无功暂态特性对系统稳定性的负面影响仅在某些特定场景才体现得较为明显。[结论] 算例表明: 提出的方法能快速高效分析各因素对系统安全稳定的影响, 深化对事物本质的认识, 并且在某些方面可以得到传统方法无法得出的结论。

关键词: 复杂大电网; 安全稳定; 有无对比; 主导因素; 实用方法

中图分类号: TM7; TM712

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)03-0095-07

开放科学(资源服务)二维码:



New Perspective and Pragmatic Method for Studying Causes of Instability of Guangdong Power Grid

XU Wei^{1,✉}, GUO Zhifei², YAO Wenfeng²

(1. Power Grid Planning Center of Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510080;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou, 510663)

Abstract: [Introduction] At present, power grid security and stability analysis practices adopted by Guangdong Power Grid can basically meet the needs of power system operations, but there are some shortcomings. It is impossible to clarify the impact of causes on security and stability of power system in a simple and effective way. [Method] This paper proposed the “with or without contrast” idea and studied the influence of various factors on system stability, and gave a pragmatic method based on this idea. [Result] This paper studies voltage instability of the Pearl River Delta power grid by adopting the new method proposed. The results show that both the transient characteristics of motor load and conventional HVDC have a significant impact on the stability of the system. In contrast, motor load have a more fundamental effect on system stability. The negative impact of conventional HVDC transient reactive power characteristics on system stability is apparent only in certain scenarios. [Conclusion] The case study shows that the method proposed in this paper can quickly and efficiently evaluate the influence of various factors on security and stability of the system, deepen our understanding of stability mechanisms of power grid, and can get conclusions that traditional methods can not draw. The ideas and methods proposed in this paper can provide useful reference for the industry to undertake similar researches.

Key words: complex large scale power grid; power system security and stability; with or without contrast; dominant factor; pragmatic method

电网安全稳定运行关系到经济社会健康发展与人民福祉, 电网企业在实际生产运行中非常重视电网安全。为保证电网安全, 需要全面深入研究电网稳定特性, 明确系统稳定性主要影响因素, 研究系

统稳定提升措施。经过多年的发展, 目前广东电网在复杂大电网安全稳定研究方面已经形成了较为成熟的思路与方法, 在电网安全稳定方面也已经开展较多研究。目前已有相关成果基本均围绕某给定网架方案进行具体计算分析, 得出相关结论。例如, 某些研究对广东电网暂态电压稳定性进行了研究,

重点分析了负荷模型、负荷突增、励磁系统对系统稳定性的影响^[1]；某些研究侧重在电压稳定的分析模型和方法，给出了防止发生电压稳定破坏的措施^[2]；某些研究以某具体受端电网为例，结合暂态电压失稳的量化评估指标，深入分析了负荷模型和扰动形式对暂态电压稳定性的影响，并提出了改善暂态电压稳定性的方法^[3]；某些研究通过计算广东电网直流逆变站在不同运行方式下的短路比分析了广东受端系统的强度，并分析了多个直流逆变站同时发生换相失败的可能性及其对广东电网安全稳定性的影响^[4]；某些研究就电网安全稳定问题总结评述了通用概念、评价指标与一般方法^[5-9]；某些研究就某个具体网架方案进行了安全稳定分析^[10-11]。这些研究加深了对广东电网的认识，为进一步深入研究奠定了良好基础。总的来看，现有研究成果在电网安全稳定影响因素分析中未能有效消除各影响因素间的相互关联与作用，多聚焦某具体网架方案，在电网安全稳定特性及影响因素分析方面未能提出广泛适用的思路与方法。

大型电力系统是一个高阶非线性动态系统，其安全稳定特性复杂。电力系统安全稳定影响因素众多，且相互之间存在复杂的耦合关系。以广东珠三角电网为例，交流电网故障可能导致近区站点电压大幅下降，导致直流逆变站发生换相失败，直流恢复换相过程中从系统吸收大量无功，将进一步拉低近区站点电压，同时可能导致近区低电压等级负荷侧马达负荷堵转，马达负荷恢复过程中同样将从系统吸收大量无功，最终导致系统电压崩溃。虽然导致系统失稳的因素存在耦合，但对于某种方式下某个具体电网而言，失稳因素是有主次之分的。为更好分析问题，更有针对性的找到提升系统稳定性的措施，有必要对系统主要失稳因素进行研究。

目前，广东电网采用的安全稳定分析方法主要通过计算相关安全评价指标，并对各类典型故障进行大范围扫描计算来评估电网安全稳定水平。现有传统方法较好满足了生产运行的需要，指导了电网规划建设运行。但传统方法也存在一定的不足，不足之处主要体现在所计算的安全评价指标过于粗线条，无法刻画电网稳定特性，典型故障扫描计算容易陷入局部，掌握全局特性困难。传统分析方法无法站在全局角度简单有效的厘清系统稳定主要影响

因素以及各因素对系统稳定性影响的大小，无法简单快捷甄别系统失稳主导因素，难以提出更有针对性的系统稳定提升措施。

本文在广东电网安全稳定研究中首次引入“有无对比”的研究思路，采取隔离各主要影响因素的方式对广东电网进行深入研究。算例充分证明了本文提出的思路与方法的有效性，可为研究长三角等类似复杂大电网安全稳定问题提供有益借鉴。

1 广东电网系统特点

广东电网是全国规模最大的省级电网。2018年广东全社会最高负荷约111 GW，用电量约6 32.300 TWh；接受西电最大容量40.08 GW，约占全社会用电负荷的36%。截至2018年底，广东电源装机容量约116.924 GW。广东省共有500 kV变电站59座，500 kV变电容量138 874 MVA；500 kV线路218回，总长度约10 500 km。经过多年发展，广东已经围绕珠三角建成较为完善的内外双环网。

广东电网是世界上最复杂的交直流混联大电网之一。截至目前，广东电网已经有9回大容量直流约32.2 GW电力集中馈入珠三角地区。广东马达负荷比例高，且有多回大容量直流集中馈入高密度负荷中心，多种因素交织导致系统安全稳定机理复杂。目前，广东电网主要面临短路电流控制困难，交直流相互影响问题突出，以及潮流控制困难、发生连锁故障的风险高等问题。

2 传统研究方法 with 内容

2.1 传统方法与内容

电力系统安全稳定计算分析的任务是掌握系统特性，确定系统稳定水平，分析和研究提高安全稳定的措施，保障电力系统的安全稳定运行。随着大电网的发展，广东电网在复杂电力系统的安全稳定分析研究方面已经形成了较为有效的思路与方法，该方法主要通过计算相关安全评价指标并对大量故障进行扫描分析来开展研究。目前，针对大电网进行的安全稳定研究具体计算分析内容主要包括多落点直流间相互影响分析、多直流有效短路比指标分析、导致多回直流同时换相失败交流故障范围分析、导致多回直流功率同时降为零交流故障范围分析、以及各类典型故障稳定扫描计算分析等。采用

该方法对2035年广东电网规划网架进行安全稳定分析的算例详见如下章节。

2.2 传统方法应用于远景广东电网稳定评估

2.2.1 计算边界

2.2.1.1 计算水平年

研究水平年为2035年,广东全社会负荷约193 GW。计算分析采用夏大方式,夏大方式的计算负荷在全社会最大负荷基础上扣除110 kV及以下电源出力后得到。广东电网的计算负荷挂在220 kV变电站的110 kV侧母线。

2.2.1.2 远景直流规模

参考规划,2035年馈入广东珠三角地区的直流共10回(如图1所示),总容量为37.2 GW。具体包括天广直流、高肇直流、三广直流、兴安直流、云广直流、糯扎渡直流、溪洛渡直流(两回)、新松直流、乌东德直流。

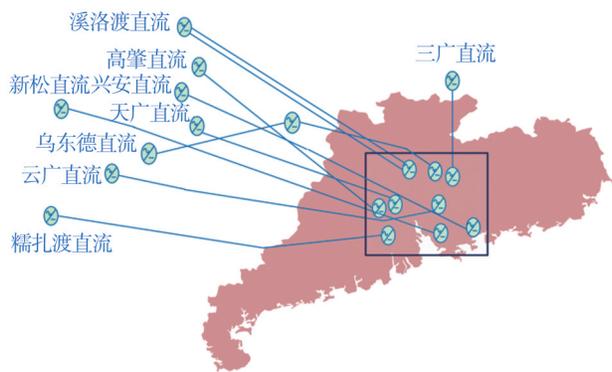


图1 2035年送广东直流示意图

Fig. 1 Diagram of HVDC infeeds in Guangdong in year 2035

2.2.1.3 负荷模型

广东、广西、云南、贵州电网均考虑50%电动机+50%恒阻抗负荷模型。海南电网采用40%恒阻抗+30%恒电流+30%恒功率负荷模型。

2.2.2 安全稳定评估

2.2.2.1 分析内容

根据2.1小节对传统分析思路与计算方法的说明,本小节广东电网规划网架安全稳定分析具体包括以下方面内容。

1) 多落点直流间相互影响指标分析。

2) 短路比分析。开展多直流有效短路比(MI-ESCR)计算分析。

3) 交流系统故障对直流影响分析。具体包括交流故障导致多回直流同时换相失败、导致多回直

流功率同时降为零统计分析。

4) 多类型故障扫描分析。具体包括:

4.1) 交流线路三永N-1故障:近故障点侧0.09秒,远故障点侧0.10 s切除。

4.2) 交流线路三永N-2故障:故障线路近故障点侧0.09 s,远故障点侧0.10 s切除故障;同塔另外一回线路0.10 s同时跳开线路两侧。

4.3) 线路单永中开关单相拒动:线路单相短路故障,故障线路所在变电站中开关单相拒动,考虑失灵保护于故障后0.35 s切除本线及同串另一回线。

4.4) 线路三永中开关单相拒动:线路三永故障,故障线路所在变电站中开关单相拒动,考虑失灵保护于故障后0.35 s切除本线及同串另一回线。

4.5) 全站失压:变电站母线三相短路,0.35 s后跳同电压等级所有出线。

2.2.2.2 稳定计算分析

1) 多直流有效短路比分析

2035年夏大正常方式下,广东电网多直流有效短路比计算结果如图2所示。总体来看,各直流多直流有效短路比较高,运行条件较好。

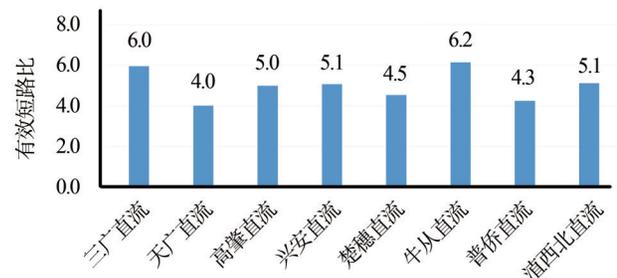


图2 正常方式下广东电网多直流有效短路比

Fig. 2 Multi-infeed effective short circuit ratio of Guangdong power grid in normal mode

2) 直流间相互影响分析

多落点直流相互作用因子(MIIF)反映了逆变站换流母线电压之间的相对变化关系,是衡量直流输电逆变站之间电气距离的量化指标。MIIF非对角元素反映了直流多落点电网中某一逆变站换流母线电压发生扰动时,其它逆变站换流母线由于电气耦合而产生的电压扰动。换流母线电压扰动一般会对直流功率产生影响。因此,受端电网中多回直流间的相互影响还必须考虑直流功率的大小。在MIIF矩阵基础上,对2035年落点广东直流间相对

电压变化加权直流功率进行计算, 标么化后的结果矩阵如表1所示。将直流间相对电压变化加权直流功率矩阵数据用图表示, 结果如图3所示, 图中橙色表示对其它直流影响较大的直流, 黄色表示受其它直流影响较大的直流, 箭头粗细表示影响相对大小。

表1 相对电压变化加权直流功率矩阵

Tab. 1 Relative voltage variation weighted HVDC power matrix

换流母线	从西	鹅城	穗东	北郊	肇庆	宝安	东方	侨乡
直流额定功率/GW	6.4	3	5	1.8	3	3	5	5
从西	1.00	0.14	0.28	0.11	0.13	0.05	0.06	0.07
鹅城	0.45	1.00	0.80	0.07	0.07	0.20	0.26	0.03
穗东	0.27	0.22	1.00	0.04	0.04	0.12	0.15	0.02
北郊	0.36	0.08	0.16	1.00	0.17	0.05	0.05	0.12
肇庆	0.32	0.06	0.13	0.12	1.00	0.04	0.07	0.25
宝安	0.07	0.13	0.29	0.02	0.10	1.00	1.17	0.05
东方	0.03	0.07	0.14	0.01	0.02	0.47	1.00	0.04
侨乡	0.05	0.02	0.04	0.03	0.10	0.04	0.06	1.00

注: 直流间相互影响较大的组合由红色标出, 颜色越深表示相互影响越大。

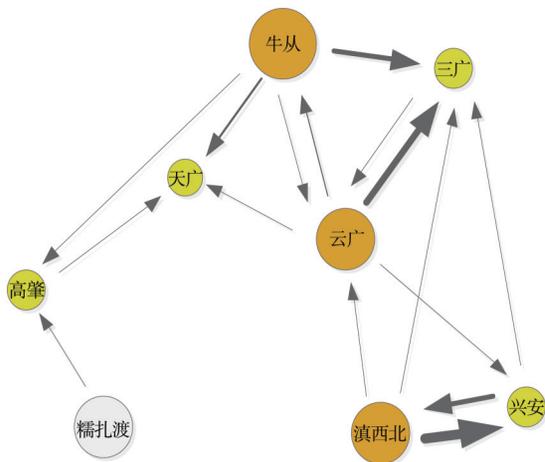


图3 直流间相互影响路径及程度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the path and degree of interaction between HVDCs

计算结果表明: (1) 从电气距离方面来看, 落点广东电网直流分区明显。其中, 从西、鹅城、穗东、北郊电气距离较近; 宝安站与东方站电气距离较近; 肇庆、侨乡站与其它换流站之间电气距离相对较远。(2) 从相互影响程度方面来看, 牛从、云广、滇西北等大容量直流对其它直流影响较大; 三广、天广、兴安、高肇等直流受其它直流影响较

大; 牛从与云广, 三广与云广, 兴安与滇西北两两之间相互影响较大。

3) 典型故障扫描分析

对广东主网进行“N-1”、“N-2”、单相单拒、三相单拒、母线三相短路跳所有出线5类故障全网扫描, 计算结果如表2所示。

表2 2035年夏大方式广东电网典型故障系统失稳故障数统计

Tab. 2 Statistics on the number of faults leading to instability of Guangdong power grid in summer peak load scenario of year 2035

故障类型	失稳故障数/个
N-1	0
N-2	6
单相单拒	4
三相单拒	26
全站失压	74

3.1) 珠三角负荷中心地区存在2处“N-2”故障系统电压失稳。在两翼大电源送出地区存在4处“N-2”故障系统功角失稳。失稳情况均可通过切机或切除部分负荷保持系统稳定。

3.2) 在大电源送出地区, 4处单相单拒故障系统失稳。

3.3) 经初步计算, 广东26处三相单拒故障导致系统失稳, 74处母线三相短路跳所有出线故障导致系统失稳。

2.3 传统方法存在的不足

复杂大电网传统安全稳定计算内容中, 相对电压变化加权直流功率矩阵、多直流有效短路比、多回直流同时换相失败(功率降为零)交流故障范围等计算分析均是对系统稳定水平粗线条的描述, 可为具体故障仿真分析提供一定指导。采用稳定计算程序对各类典型故障进行的仿真计算是对系统稳定水平的量化评估, 此类计算类似“黑匣子”方法, 不能直接回答系统为何失稳, 系统失稳的主导因素是什么等问题。为深入分析复杂大电网故障暂态过程中系统主要参数变化情况, 可以通过电磁暂态程序进行更为详细的故障仿真。

总体来讲, 广东电网目前采用的大型复杂电网传统安全稳定计算分析内容要么过于粗线条, 无法深入掌握电网稳定特性, 要么容易陷入局部, 掌握全局特性困难。传统分析方法无法站在全局角度简

单有效的厘清系统稳定主要影响因素以及各因素对系统稳定性影响的大小,无法简单快捷甄别系统失稳主导因素,掌握系统失稳本质原因。

3 广东稳定问题研究新视角与实用方法

3.1 广东稳定问题研究新视角

交直流混联复杂大电网安全稳定分析困难的一个非常重要的原因是系统稳定影响因素众多,且各因素之间相互交织相互影响,很难甄别系统失稳的真实影响因素。例如,珠三角负荷中心某条线路发生三相短路,将同时导致故障近区电压降低,用电负荷有功无功需求变化,无功补偿设备出力变化,潮流的转移,近区直流换相失败或闭锁等。如果在这种情况下系统失稳,虽然可以明确线路发生的三相短路是系统失稳过程的起点,但难以确定系统失稳过程中各影响因素扮演的角色以及哪些因素占主导。而掌握这些对于把握系统稳定特性,研究针对性稳定提升措施具有重要意义。目前,普遍采用的传统方法难以很好解决这些问题。因此,急需一种简单、高效、普适的方法,来全面评估复杂大电网中各因素对系统稳定的影响程度,有效甄别主导因素。

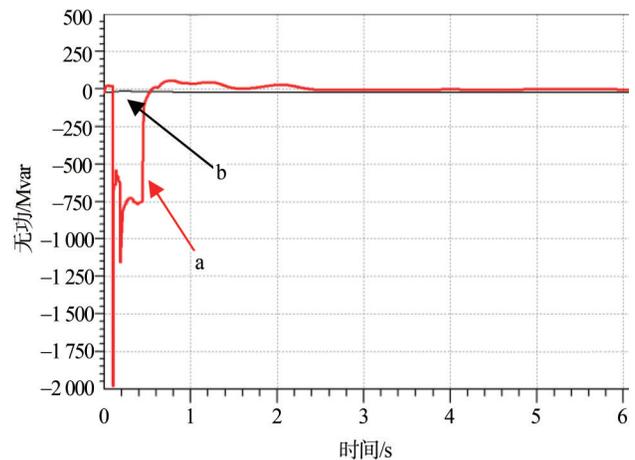
正是在这样的背景下,本文提出了一种新思路来开展这方面的研究,该思路的要点是:首先根据经验筛选出影响系统稳定为数不多的几个因素,然后再将其中某个因素进行隔离,以“有无对比”的方法,研究被隔离因素的影响。以广东珠三角电网为例,由于负荷密度高,电网密集,又有多回大容量直流集中馈入,交直流相互影响和电压稳定问题突出,珠三角单一交流故障就可能导致系统电压失稳。相关研究表明,珠三角电网电压失稳主要受马达负荷和常规直流在暂态过程中的无功特性的影响。为探究在失稳过程中,马达负荷和常规直流暂态特性分别有多大影响,可以考虑“隔离”常规直流在暂态过程中的动态无功响应效应,来研究常规直流对电压失稳的影响;或者“隔离”马达负荷无功效应,来研究马达负荷对电压失稳的影响。

3.2 实现方法与案例分析

3.2.1 实现方法

针对广东珠三角电压失稳突出的问题,本节具

体研究马达负荷和常规直流对广东电网电压稳定的影响。对马达负荷而言,可以将系统中马达负荷比重分别取不同值,以此来研究马达负荷对系统电压稳定性的影响。对常规直流而言,为消除暂态过程中常规直流吸收大量无功对系统稳定的影响,使其由不可控变量变成可控变量或不变量,以“有无对比”的方式研究其对系统的影响,可以考虑取消常规直流、并在受端500 kV换流母线注入相应规模恒定有功功率。仿真结果表明,此替代方法在保证直流向系统注入的有功功率基本不变的情况下,有效消除了常规直流暂态过程中的无功消耗。以兴安直流为例,在近区发生交流故障情况下,取消兴安直流前后宝安换流母线与系统间无功交换如图4所示(负数表示换流母线从系统吸收容性无功),仿真表明此种实现方法可以达到消除暂态过程中常规直流无功消耗的目的。



注: a为直流取消前无功交换;b为直流取消后无功交换

图4 取消兴安直流前后宝安换流母线与系统间无功交换 (Mvar)

Fig. 4 Reactive power exchange between Baoan commutation bus and system before and after Xingyi-baoan HVDC cancelled (Mvar)

3.2.2 广东电网案例分析

按照以上思路,以广东2035年规划电网为例,研究马达负荷和常规直流在故障暂态过程中的响应对系统电压失稳的影响。广东电网马达负荷占比分别考虑50%、30%、10%三种情况;常规直流分别考虑保留全部直流(即原规划网架),仅取消牛从、楚穗、滇西北三回直流,和取消全部直流三种情况。针对以上9种组合场景分别进行“N-1”、“N-2”、单相单拒、三相单拒、母线三相短路

跳所有出线5类故障全网扫描,计算结果如表3所示。

表3 2035年夏大方式系统电压失稳故障数统计

Tab. 3 Statistics on the number of faults leading to voltage instability in summer peak load scenario of year 2035

计算场景	故障类型	原网架/个	取消3回/个	取消全部/个
马达负荷 占比50%	N-1	0	0	0
	N-2	2	0	0
	单相单拒	0	0	0
	三相单拒	16	7	5
	母线故障	67	62	60
马达负荷 占比30%	N-1	0	0	0
	N-2	0	0	0
	单相单拒	0	0	0
	三相单拒	0	0	0
	母线故障	22	21	20
马达负荷 占比10%	N-1	0	0	0
	N-2	0	0	0
	单相单拒	0	0	0
	三相单拒	0	0	0
	母线故障	5	5	5

结合计算结果,可以得到如下初步结论:

1) 马达负荷与常规直流在故障期间的暂态特性对系统稳定性均产生重大影响。初步分析结果表明,马达负荷对系统稳定性具有更为基础性作用,常规直流无功暂态特性对系统稳定性的负面影响仅在某些特定场景才体现得较为明显。直流恢复换相过程中吸收大量无功对系统稳定性的负面影响主要在马达负荷比重较高(如50%)、且系统发生较为严重故障(如三相单拒故障)情况下体现。马达负荷比重不高,或者系统发生一般故障或极端严重故障(如母线故障跳所有出线)情况下,暂态过程中直流大量无功消耗对系统稳定性的负面影响体现不明显。

2) 与规划网架相比,若无直流落点,广东电网在发生三相单拒故障下系统稳定性提升较为明显(故障数减少约70%);其它类型故障下系统稳定性提升不明显。

3) 暂态过程中直流无功需求对系统电压稳定的负面影响边际效应递减明显。初步计算表明,取消全部直流与仅取消3回直流对提升系统稳定性的效果接近。

近年来,国内多家知名研究机构对广东电网存在的主要问题及未来发展方向先后做了系统深入研究,梳理总结出广东电网主要存在短路电流控制困难,交直流相互影响问题突出,以及潮流控制困难、发生连锁故障的风险高三大问题。在广东电网交直流相互影响方面做了大量研究分析,总结出交直流相互影响导致系统失稳的经典场景为:交流系统故障导致流换流母线电压骤降幅度大,直流换相失败,故障清除后,直流恢复换相过程中吸收大量无功,导致系统电压不能顺利恢复,系统失稳。纵观广东交直流相互影响方面众多研究报告,可以总结出广东交直流相互影响导致系统失稳的风险巨大。

本文采用新方法对广东电网进行的案例分析进一步揭示了广东珠三角电压失稳的主导因素与失稳本质。同时,也进一步增进了我们对广东电网交直流相互影响问题的认识,有助于全面准确掌握交直流相互影响在广东电网面临诸多风险中的地位,不低估、也不夸大其对系统安全稳定的影响。通过传统方法无法快速有效得到以上深化的认识。

4 结论

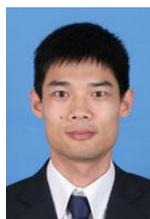
本文梳理了广东电网采用的复杂大电网安全稳定传统研究方法特点与计算内容,并用传统方法对广东远景规划网架进行了安全稳定分析,并指出了传统方法存在的不足。结合传统方法存在的不足及生产运行实际需要,本文提出了一种站在全局角度简单有效厘清各因素对系统稳定性影响大小的新思路与实用方法。与传统方法相比,本文方法具有简单、高效、“白盒”可解释等优点,可作为传统方法有益补充。远景广东电网规划网架案例分析,充分证明了本文提出的思路与方法的有效性;同时,进一步揭示了广东珠三角电压失稳本质,也进一步深化了我们对广东电网交直流相互影响问题的认识。本文提出的方法为业内人士开展相似研究,厘清复杂系统失稳主导因素及各因素影响程度、研究系统稳定提升措施在思路和方法上将提供有益参考。

参考文献:

- [1] 陈辉祥,王仲鸿,崔文进,等. 广东电网电压稳定研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(7):86-89.
CHEN H X, WANG Z H, CUI W J, et al. Study on voltage stability of Guangdong power grid [J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2014, 28(7):86-88.
- [2] 刘嘉宁,吴小珍. 广东电网电压稳定问题的研究[J]. 广西电力, 2007, 2(1):1-4.
LIU J N, WU X Z. Study on voltage stability of Guangdong power grid [J]. Guangxi Electric Power, 2007, 2(1):1-4.
- [3] 侯建兰,马冰,刘育权,等. 电网暂态电压稳定的主要影响因素量化分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6):28-34.
HOU J L, MA B, LIU Y Q, et al. Quantitative analysis of main factors influencing transient voltage stability of power grid [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6):28-34.
- [4] 李峰,管霖,钟杰峰,等. 广东交直流混合电网的运行稳定性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11):1-4+35.
LI F, GUAN L, ZHONG J F, et al. Study on stability of Guangdong AC/DC hybrid power grid [J]. Power System Technology, 2005, 18(3):1-4+35.
- [5] 邵瑶,汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17):24-30.
SHAO Y, TANG Y. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems [J]. Power System Technology, 2009, 33(17):24-30.
- [6] 余贻鑫. 电压稳定研究述评[J]. 电力系统自动化, 1999(21):3-5.
YU Y X. Research survey on voltage stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999(21):3-5.
- [7] 蒙定中. 防止广东电网大停电的建议[J]. 广东电力, 2005(3):1-12.
MENG D Z. Recommendations to prevent Guangdong power system cascading blackout [J]. Electric power, 2005(3):1-12.
- [8] 程鑫,杨燕,徐蔚,等. 多直流馈入电网规划方案评价指标体系[J]. 广东电力, 2018, 31(10):117-126.
CHENG X, YANG Y, XU W, et al. Evaluation index system of multi-infeed DC power grid planning schemes [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10):117-126.
- [9] 吴小珊,涂亮,柳勇军,等. 电网大扰动动态稳定的机理和仿真研究[J]. 云南电力技术, 2018, 46(3):41-45.
WU X S, TU L, LIU Y J, et al. The mechanism and simulation study of the dynamic stability of power grid following large disturbances [J]. Yunnan electric power, 2018, 46(3):41-45.
- [10] 杨雄平,李扬絮,罗向东. 2009年广东电网动态稳定问题分析研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4):40-43.
YANG X P, LI Y X, LUO X D. Study of dynamic stability problem in Guangdong power grid in 2009 [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4):40-43.
- [11] 杨燕,林勇,徐蔚,等. 乌东德多端直流输电对广东电网安全稳定性的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(11):44-50.
YANG Y, LIN Y, XU W, et al. Influence of Wudongde multi-terminal HVDC on security and stability of Guangdong power grid [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11):44-50.

作者简介:



徐蔚

徐蔚(通信作者)

1984-, 男, 湖北武汉人, 广东电网规划研究中心专责, 浙江大学电气工程硕士研究生, 主要从事电网规划、电力系统安全稳定分析相关工作 (e-mail) 153805379@qq.com。

郭知非

1986-, 男, 湖南岳阳人, 南方电网科学研究院研究员, 湖南大学电气工程硕士研究生, 主要从事电网规划、电力系统安全稳定分析相关工作 (e-mail) guozf@csg.cn。

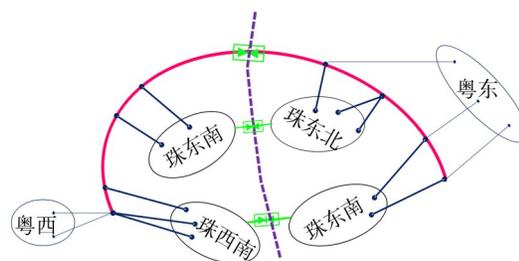
姚文峰

1980-, 男, 湖南娄底人, 南方电网科学研究院室主任, 湖南大学电气工程硕士研究生, 主要从事电力系统稳定分析与控制、电网规划设计 (e-mail) yaowf@csg.cn。

(责任编辑 李辉)

能源知识

随着电力系统不断发展和外部环境的变化, 广东500千伏内外环网结构存在的短路电流超标、多直流相互影响、大面积事故风险等问题日益突出。为解决广东电网存在的主要问题, 近年来开展广东电网目标网架研究。根据多方案技术经济比较, 广东拟采用基于500 kV外环的柔直互联方案作为广东远景目标网架形态。网架形态下图所示。



广东电网远景目标网架形态

Target power grid structure of guangdong province

(徐蔚)