

基于相轨迹凹凸性的暂态失稳判据准确性验证

范新凯, 杨松浩, 赵一铭, 张保会

(西安交通大学 电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:已有研究证明基于相轨迹凹凸性的暂态失稳判据在二阶单机无穷大自治系统中严格成立,但将该判据推广到多机非自治时变系统中时,难以从理论上严格证明其正确性,因此通过大量暂态算例来验证凹凸性失稳判据在多机系统中的准确性和适用性。给出并详细阐述基于相轨迹凹凸性的暂态失稳识别流程,该流程改进了已有文献的实时分群方法,并补充了2个辅助判据,然后分别在IEEE 39节点系统和IEEE 145节点系统不同潮流方式、故障位置和故障持续时间下总计64 566个算例进行扫描,结果表明,凹凸性判据的动作正确率高于99.9%,能够可靠、准确、快速地启动紧急控制。

关键词:相轨迹;凹凸性;暂态失稳识别;故障扫描;紧急控制

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011005

0 引言

暂态功角稳定性的判别和控制一直是电力系统研究的重要和困难问题之一^[1]。目前,研究暂态稳定问题的分析方法主要有时域仿真法^[2]、直接法^[3]、混合分析法^[4]、人工智能方法^[5]和基于轨迹信息的方法^[6-21]等。其中,时域仿真法、直接法和混合分析法的结果往往依赖于准确的系统模型和参数。当系统的模型和参数存在误差时,分析结果可能存在较大的误差。而人工智能方法需要对大量的数据样本进行训练,其结果的可解释性通常不及其他方法,在线应用时较为困难。随着广域测量系统的发展,构建基于实测轨迹信息、不依赖模型和参数的电力系统暂态稳定性预测成为可能。

目前在基于相轨迹信息的暂态失稳识别和紧急控制方法方面已进行了大量的探索与研究。文献[6]提出了单机系统中相轨迹凹凸性与系统暂态稳定性的对应关系。文献[7]严格证明了在二阶单机无穷大自治系统中利用相轨迹凹凸性拐点作为系统不稳定识别点的可靠性,并将凹凸性判据从单机系统推广到了多机系统。针对在暂态过程中失稳模式可能发生变化的情况,文献[8]提出了实时分群的方法,提高了方法对大电网复杂暂态的适应性;系列文献[9-11]对基于相轨迹凹凸性的暂态失稳判别方法进行了系统的总结和发展;文献[12-15]分别通过相轨迹斜率曲线拟合、空间降维变换和修正聚合单机

系统的方法解决了凹凸性指标计算毛刺、分群错误和非理想两群振荡模式导致的误判问题。由于基于相轨迹凹凸性的暂态失稳识别方法仅利用聚合系统相轨迹的几何特征即可准确识别系统暂态失稳,具有算法简单、动作可靠的特点,文献[16-21]将这一方法推广到重要输电断面上关键支路的稳定性判别和电力系统的暂态稳定紧急控制领域。

虽然目前的研究已经证明了基于相轨迹凹凸性的暂态失稳识别方法在二阶单机无穷大自治系统中的正确性,但是其在多机非自治时变系统中的正确性很难从理论上得到严格证明。对此,可以通过大规模的暂态算例来验证凹凸性判据在多机系统中的准确性和适用性。本文给出并详细阐述了基于相轨迹凹凸性的暂态失稳识别流程,该流程改进了已有文献的实时分群方法,并补充了2个辅助判据;然后分别在IEEE 39节点系统和IEEE 145节点系统进行了大量仿真验证,故障扫描结果表明凹凸性判据具有极高的动作正确率和可靠性。

1 基于相轨迹凹凸性的暂态失稳判别方法的基本原理与实现要点

1.1 基于相轨迹凹凸性的暂态失稳判别方法

对于二阶单机无穷大自治系统,其相轨迹的斜率 k 的定义如式(1)所示。

$$k = \frac{d\Delta\omega}{d\delta} = \frac{\Delta P/M}{\omega_0 \Delta\omega} \quad (1)$$

其中, δ 为发电机功角; ω_0 为同步角速度; $\Delta\omega$ 为角速度偏差,为标么值; M 为发电机转动惯量; ΔP 为不平衡功率。

进一步地,将相轨迹的凹凸性指标 l 定义为:

$$l = \frac{d^2\Delta\omega}{d\delta^2} = \frac{dk}{d\delta} \quad (2)$$

若 $l\Delta\omega < 0$,则相轨迹是凹的;若 $l\Delta\omega > 0$,则相轨

收稿日期:2020-01-13;修回日期:2020-09-04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900603);
国家电网公司科技项目(52094017000W)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900603) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094017000W)

迹是凸的;满足 $l\Delta\omega=0$ 的点的集合为拐点曲线。

文献[8-11]指出,拐点曲线是一条系统暂态失稳的标识曲线。拐点曲线将相平面划分为凹和凸的 2 个区域,如图 1 所示。图中 $\Delta\omega$ 为标么值,后同。

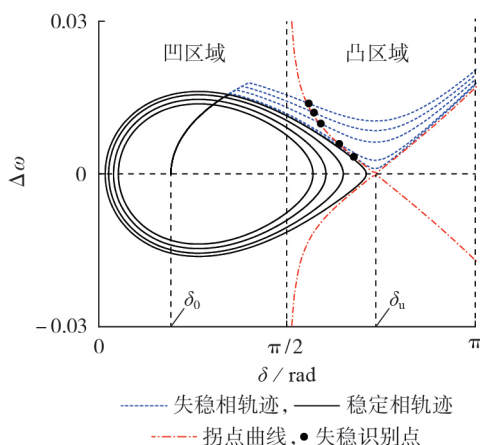


图 1 相轨迹凹凸性与暂态稳定性的对应关系

Fig.1 Relationship between phase trajectory's concave-convexity and transient stability

当扰动后的系统稳定时,其相轨迹一直位于凹区域内,与凹凸性拐点曲线不相交;若相轨迹与拐点曲线相交进入凸区域且不采取紧急控制措施,系统将向不稳定方向发展。因此观察系统的轨迹是否由凹变凸,即可以判断系统是否失稳。

通过互补群惯量中心相对运动(CCCOI-RM)变换可以将相轨迹凹凸性失稳判据从单机系统推广到多机系统。其基本思路是实时地将系统中的发电机分为两群,采用 CCCOI-RM 变换将这两群发电机聚合为一个单机系统,然后利用聚合单机系统的相轨迹凹凸性特征进行稳定性判断,变换过程见文献[10]中的式(2)~(6)。

1.2 基于相轨迹凹凸性识别暂态失稳的关键技术

基于相轨迹凹凸性的失稳识别流程见图 2。在图 2 所示的流程中,需要注意以下 4 个要点。

(1) 实时分群。

在暂态过程中,系统的失稳模式很有可能发生变化^[22],因此保证多机系统在暂态过程中每一时刻都正确地实现分群,而不是仅依靠故障后某一段时间进行固定的分群,是凹凸性判据准确可靠的前提和关键。近来的文献中已经较多地讨论了因发电机错误分群而导致凹凸性判据误判的情况^[23],这些情况基本上都可以通过实时分群避免。

文献[10]提出了基于最大功角间隙的实时分群方法,笔者在后续的研究中发现当系统功角回摆接近故障前初始功角时,各发电机的功角间隙都较小,前述基于最大功角差的方法分群方法可能存在错误分群的风险,从而导致凹凸性判据误判。进一步观察发现,虽然此时两群的功角特征差异不大,但其角

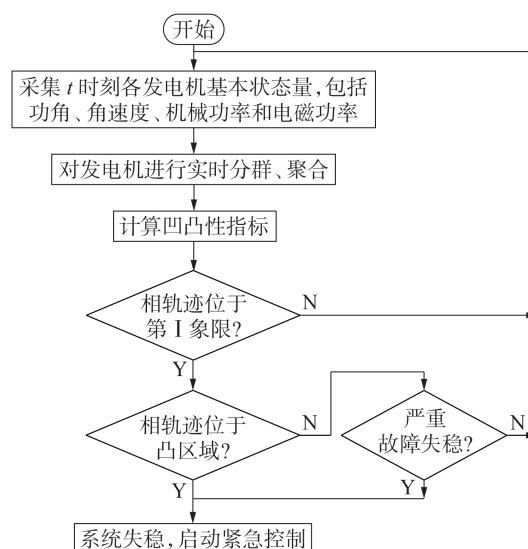


图 2 基于相轨迹凹凸性的电力系统暂态失稳识别流程

Fig.2 Flowchart of transient instability identification scheme based on phase trajectory's concave and convexity 速度差异明显。因此,本文给出一种采用功角、角速度综合信息的实时分群方法,其基本思路是在功角分群明显时采用最大功角差进行分群,而在功角差较小时采用最大角速度差进行分群,具体流程如图 3 中的虚线方框内所示,其中 $\Delta\delta_s^{\text{err}}$ 为设定的功角间

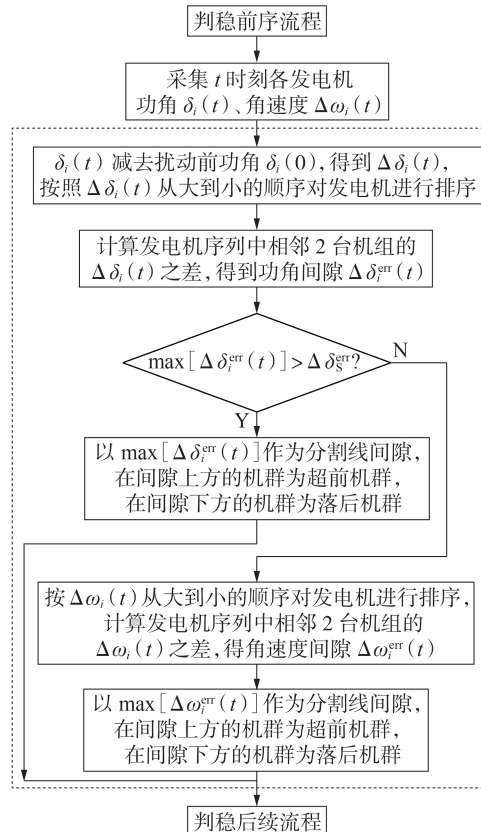


图 3 基于功角-角速度综合信息的实时分群方法

Fig.3 Real-time generator grouping method based on power angle and angular speed

隙门槛值。

(2) 聚合单机凹凸性指标计算。

在求取凹凸性指标 l 的过程中,注意相轨迹斜率应采用式(3)进行计算。

$$k(t) = \frac{(P_{\text{meq}}(t) - P_{\text{eq}}(t)) / M_{\text{eq}}}{\omega_0 \Delta \omega_{\text{eq}}(t)} \quad (3)$$

其中, $P_{\text{meq}}(t)$ 、 $P_{\text{eq}}(t)$ 、 M_{eq} 、 $\Delta \omega_{\text{eq}}(t)$ 分别为 CCCOI-RM 变换后聚合单机系统的机械功率、电磁功率、转动惯量和角速度。

文献[7]中的凹凸性指标计算公式如式(4)所示。

$$k(t) = \frac{\Delta \omega_{\text{eq}}(t) - \Delta \omega_{\text{eq}}(t - \Delta t)}{\delta_{\text{eq}}(t) - \delta_{\text{eq}}(t - \Delta t)} \quad (4)$$

其中, δ_{eq} 为聚合功角。

式(4)采用差分计算 $k(t)$,再经式(2)采用差分计算 $l(t)$,相当于对功角与角速度进行了二阶差分,很容易将噪声信号放大形成“毛刺”。而采用式(3)计算 $k(t)$ 可以将整个 $l(t)$ 的求取过程降阶为一阶差分。图4对比了采用式(3)和式(4)得到的凹凸性指标曲线,显然采用式(3)可以有效避免“毛刺”问题。

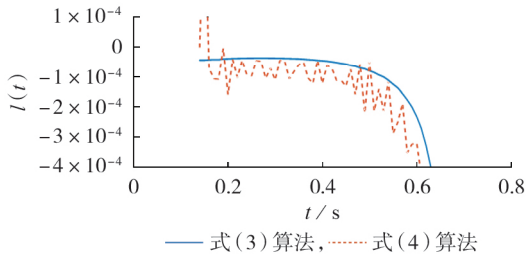


图4 2种凹凸性指标算法对比

Fig.4 Comparison between two concave-convex index calculation algorithms

(3) 严重故障失稳补充判据。

凹凸性判据有效的前提之一是故障后的系统存在稳定平衡点。如果发生严重失稳故障,系统可能没有稳定平衡点,如图5(a)所示;或者故障切除时间过晚,轨迹的功角已经越过了不稳定平衡点对应的功角,如图5(b)所示。

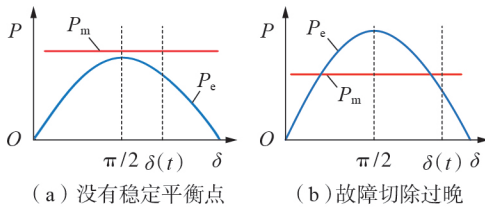


图5 严重故障失稳补充判据示意图

Fig.5 Schematic diagram of supplementary criteria for severe unstable case

在这2种情况下,相轨迹可能会错过第1个凸区域区间,进而对暂态失稳判别的速度造成不利影响。

为提高严重故障场景下暂态失稳识别的快速性,本文采用了如式(5)所示的补充判据。

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{eq}}(t) = P_{\text{meq}}(t) - P_{\text{eq}}(t) > 0 \\ \Delta P_{\text{eq}}(t) - \Delta P_{\text{eq}}(t - \Delta t) > 0 \\ \delta_{\text{eq}}(t) > \pi/2 \end{cases} \quad (5)$$

若式(5)中的3个条件均满足,则认为系统出现了严重故障失稳,应该直接启动紧急控制。

(4) 第Ⅱ/Ⅲ/Ⅳ象限闭锁。

已有的研究表明^[24],当单机无穷大自治系统阻尼 $D > 0$ 时,轨迹经过动态鞍点后只能沿其不稳定流形方向发展,因此在正向摇摆($\Delta \omega > 0$)时,轨迹不可能在第Ⅱ象限($\Delta \omega > 0, \delta < 0$)失去稳定;而反向摇摆($\Delta \omega < 0$)时,轨迹不可能在第Ⅳ象限($\Delta \omega < 0, \delta > 0$)失去稳定。因此,检测到相轨迹位于相平面的第Ⅱ、Ⅳ象限时可以直接闭锁凹凸性判据。

此外,当采用上文(1)中的实时分群算法时:若采用功角信息分群,轨迹不可能在第Ⅱ、Ⅲ象限失稳(详细解释见附录A);若采用角速度信息分群,超前群聚合角速度一定大于滞后群聚合角速度,此时聚合相轨迹一定位于第Ⅰ、Ⅳ象限。因此综合上述分析,可设置凹凸性判据在第Ⅱ/Ⅲ/Ⅳ象限闭锁,只在第Ⅰ象限时启动,以减少计算量,提高计算效率。

2 基于BPA-MATLAB交互的故障扫描与凹凸性判据验证

2.1 验证框架

本文基于BPA与MATLAB的交互,实现多机系统中多潮流方式下,多故障点、多故障持续时间的大规模算例仿真验证。验证系统基本框架如附录B中的图B1所示。其中,MATLAB有故障生成和失稳识别两大功能模块。故障生成模块通过修改BPA软件的稳态潮流文件“.dat”和暂态稳定文件“.swi”实现潮流方式、故障位置和故障时间的自动修改,并调用BPA程序“pfnt.exe”与“swnt.exe”分别进行潮流计算与暂态稳定计算。生成大量暂态算例后,MATLAB失稳识别模块读取暂态稳定数据进行稳定性判别并输出结果,以验证凹凸性判据的准确性。

2.2 验证方案设置

本文采用IEEE 39和IEEE 145节点系统进行验证。

(1) IEEE 39节点系统验证方案。

IEEE 39节点系统结构如附录B中的图B2所示,其中同步发电机均采用双轴模型,并配有调压器和电力系统稳定器(PSS),负荷采用恒阻抗模型。为充分验证方案对不同潮流方式的适应性,对于IEEE 39节点系统,分别模拟了标准、夏大、夏小、冬大和冬小5种典型潮流方式。附录B中的图B3给出了各

发电机在不同潮流方式下的出力,其中 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_8 被视为水轮机,在夏季多发,剩余机组为汽轮机,在冬季多发。

在每种潮流方式下,考虑0 s时在每条线路50%处发生三相短路接地故障,故障切除时间 t_c 的取值范围为50~300 ms,变化步长为2 ms,则在每种潮流方式下,34条故障线路和126种故障持续时间组合可以获得4284个暂态算例。每个暂态仿真算例设定仿真步长为10 ms,仿真时间为5 s。

此外,为验证凹凸性判据对不同故障位置的适应性,在标准潮流方式下还考虑了故障发生在各输电线路10%和90%处的情况。不同潮流方式和故障位置的组合如表1所示。

表1 不同潮流方式和故障位置组合

Table 1 Combination of different power flow modes and fault locations

组合	潮流方式	故障位置 / %	组合	潮流方式	故障位置 / %
1	标准	10	5	夏小	50
2	标准	50	6	冬大	50
3	标准	90	7	冬小	50
4	夏大	50			

综合考虑上述所有潮流方式和故障位置,在IEEE 39节点系统中总共可以获得29988个算例。

(2) IEEE 145节点系统验证方案。

IEEE 50机145节点系统结构如附录B中的图B4所示,其中同步发电机采用经典模型,负荷采用恒阻抗模型。标准潮流方式下,0 s时在各线路50%处分别设置三相短路故障,故障切除时间 t_c 的取值范围为200~600 ms,变化步长为4 ms,采用BPA软件进行仿真计算,最终获得有效算例34578组。

3 验证结果

本文采用常用的功角门槛值方法对所有暂态算例进行暂态稳定性识别,作为校验凹凸性判据准确性的标准。

3.1 IEEE 39节点系统验证结果

本文采用图2所示的暂态失稳识别流程对各暂

态算例进行稳定性判别,其结果用于启动电力系统紧急控制,因此可以利用紧急控制启动的正确率、误动率和拒动率综合验证凹凸性判据的强壮性。其中,误动率为误判样本(稳定样本被误判定为不稳定样本)占有所有稳定样本的比例,拒动率为漏判样本(不稳定样本被判别为稳定样本)占有所有不稳定样本的比例,正确率为判断正确的样本占总样本的比例。为了进一步展示临界情况下凹凸性判据动作的正确率,样本被分为“临界稳定”、“临界失稳”、“非临界稳定”与“非临界失稳”4个子集。其中子集“临界稳定”、“临界失稳”指故障切除时间与临界切除时间(CCT)相差在20 ms以内的算例;“非临界稳定”与“非临界失稳”指故障切除时间与CCT相差超过20 ms的算例。

在IEEE 39节点系统中的验证结果如表2所示,表中验证组合号定义与表1相同。由表2可知,IEEE 39节点系统在不同潮流方式和故障位置下,暂态稳定算例和暂态失稳算例的数目相对均衡,较为全面地展示了系统的各种暂态场景。凹凸性判据验证结果表明,凹凸性判据的整体动作正确率达到了99.89%,其中拒动率为0,即凹凸性判据可以准确地识别所有的暂态失稳样本,从而准确地启动紧急控制。此外,凹凸性判据的误动全部集中在临界情况,且即使仅考察临界情况算例,凹凸性判据的误动率仍然非常低。

为考虑凹凸性判据的动作速度,笔者统计了不同故障切除时间 t_c 下凹凸性判据识别系统失稳所需要的时间,如图6所示。图中, t_{iden} 为各故障持续时间对应的凹凸性判据识别失稳场景所需要的平均时间。由图可以看出,无论在临界失稳还是严重失稳的情况下,凹凸性判据大都可以在0.4 s内进行准确识别。随着故障持续时间的增加,凹凸性判据识别系统失稳的速度也越来越快。凹凸性判据这种自适应于故障严重程度的特点,有利于保证紧急控制的有效性。

需要注意的是,验证组合1中的大部分失稳算例为首摆失稳,因此失稳判别时间较快。但是当系

表2 IEEE 39节点系统凹凸性判据准确性验证结果

Table 2 Accuracy verification results of concave-convex criterion in IEEE 39-bus system

组合	稳定样本数	失稳样本数	非临界稳定误动率 / %	非临界失稳拒动率 / %	临界稳定误动率 / %	临界失稳拒动率 / %	正确率 / %
1	2238	2046	0	0	0.88	0	99.93
2	2347	1937	0	0	0.29	0	99.98
3	2225	2059	0	0	0	0	100
4	2208	2076	0	0	7.94	0	99.37
5	3270	1014	0	0	0	0	100
6	1083	3201	0	0	0	0	100
7	2326	1958	0	0	0	0	100
平均值	2042	2041	0	0	1.30	0	99.89

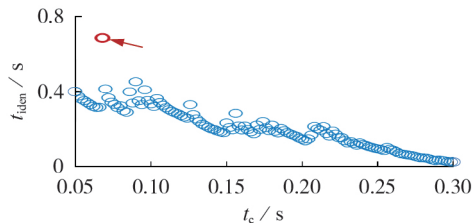


图6 系统失稳识别时间(IEEE 39节点系统,验证组合1)
Fig.6 Instability identification time(IEEE 39-bus system, Combination 1)

统发生多摆失稳时,凹凸性识别时间会对应延长。例如,当线路26-29发生故障,故障切除时间为0.068 s时,系统第二摆失稳。因此,凹凸性判据在系统进入第二摆时(1.51 s)准确识别系统失稳,如图6中箭头指向的“○”所示,此场景下失稳识别时间相对于其他场景要更久。

3.2 IEEE 145节点系统验证结果

在IEEE 145节点系统中,凹凸性判据仍然表现出了极高的动作正确率,详细结果如表3所示。由于IEEE 145节点系统较为“坚强”,总计获得稳定样本31 881组,不稳定样本2 697组。由表3所示的失稳识别结果可知,凹凸性判据在IEEE 145节点系统中仍保持了极低的误动率和拒动率,动作正确率达到了99.93%。

对于紧急控制而言,误动作需要付出不必要的控制代价,而拒动作则会对系统的暂态稳定性造成威胁,所以都应当尽量避免。而凹凸性判据“极低误动率和拒动率,极高动作准确率”的特点可以确保紧急控制具有极高的可靠性,具有应用于工程实际的潜力。

4 讨论

4.1 辅助判据的作用

区别于已有的凹凸性失稳识别方法^[10],本文补充提出了象限闭锁和严重故障辅助判据,下面对其作用进行讨论。

(1)第Ⅱ/Ⅲ/Ⅳ象限闭锁的作用。

如前文所述,象限闭锁既可以提高失稳的判别准确性,又可以减少计算量、提高计算效率。此外,象限闭锁还可以在在一定程度上避免因发电机不同调导致的误判。

发电机的不同调会导致获得的聚合单机系统的暂态稳定特性与理想单机自治系统不同,如滑步现

象^[25]等。针对发电机不同调导致的暂态稳定性评估可靠性下降的问题,可以通过修正聚合单机系统来避免^[15]。从另一个角度而言,发电机不同调多发生在聚合相轨迹回摆时刻,如图7所示。在图7(a)中矩形框所示的时间区间内,部分超前机组已经回摆,但同群的剩余机组还在正向摆动。此时的相轨迹刚进入第Ⅳ象限,并且呈现凸的特征,采用象限闭锁即可成功避免这类情况的误判。

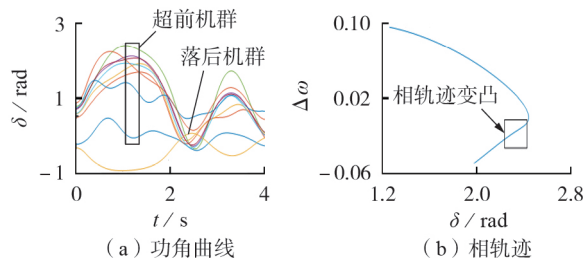


图7 发电机不同调导致相轨迹在第Ⅳ象限变凸

Fig.7 Incoherency of generator leads to convex phase trajectory in Quadrant IV

表4给出了加入象限闭锁前后凹凸性判据整体误动率的对比,表中采用象限闭锁前、后的平均误动率分别为2.87%、0.2122%,可知象限闭锁有效地提高了凹凸性判据的可靠性。

表4 第Ⅱ/Ⅲ/Ⅳ象限闭锁对凹凸性判据误动率的影响
Table 4 Influence of shielding Quadrant Ⅱ/Ⅲ/Ⅳ on misoperation rates of concave-convex criterion

组合	误动率 / %		组合	误动率 / %	
	闭锁前	闭锁后		闭锁前	闭锁后
1	0.4027	0.1340	5	0.0612	0
2	0.2558	0.0426	6	14.8661	0
3	0.1348	0	7	2.7969	0.0860
4	1.6048	1.2228			

(2)严重故障辅助判据的作用。

严重故障判据不会影响凹凸性判据的准确性,而是作为提升其快速性的辅助判据。表5给出了采用严重故障辅助判据后对失稳识别速度的提升效果。由表可见,严重故障辅助判据将暂态失稳识别的平均时间从0.4 s缩短至0.25 s,这对保证紧急控制的有效性至关重要。

4.2 误判影响分析

在IEEE 39节点系统和IEEE 145系统中,凹凸性判据和功角门槛值结果不一致主要分为以下2类情况。

(1)系统表现出多摆失稳,但在设定的仿真时

表3 IEEE 145节点系统凹凸性判据验证结果

Table 3 Accuracy verification results of concave-convex criterion in IEEE 145-bus system

组合	稳定样本数	失稳样本数	非临界稳定误动率 / %	非临界失稳拒动率 / %	临界稳定误动率 / %	临界失稳拒动率 / %	正确率 / %
8	31 881	2 697	0.02	0	7.83	0	99.93

表5 严重故障辅助判据对失稳识别速度的提升
Table 5 Improvement of instability identification speed with auxiliary criterion on severe failures

组合	失稳识别时间 / s	
	加入辅助判据前	加入辅助判据后
1	0.4101	0.2063
2	0.4492	0.2400
3	0.4461	0.2215
4	0.2720	0.2126
5	0.2909	0.2085
6	0.3534	0.2988
7	0.5465	0.3592
平均值	0.3955	0.2496

间(5 s)内功角曲线尚未越过功角差判据设定门槛,根据功角门槛值将系统误判为稳定。这种情况下,凹凸性判据可以准确识别出系统失稳,如图8所示。

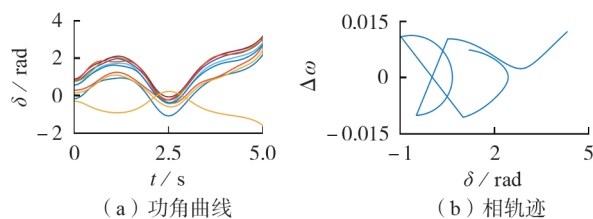


图8 凹凸性判别失稳但功角差判据尚未越过设定门槛

Fig.8 System is identified as unstable by concave-convex criterion while maximum rotor angle has not yet crossed set threshold

(2)在极少数情况下,凹凸性判据将系统处于临界稳定状态误判为暂态失稳,错误启动紧急控制。这种临界误判集中在聚合相轨迹角速度接近0的区间,且通常伴有非理想两群振荡的特征,如图9所示。因此,未来可考虑结合角速度和分群信息,进一步提高凹凸性判据在临界稳定情况下的准确率。

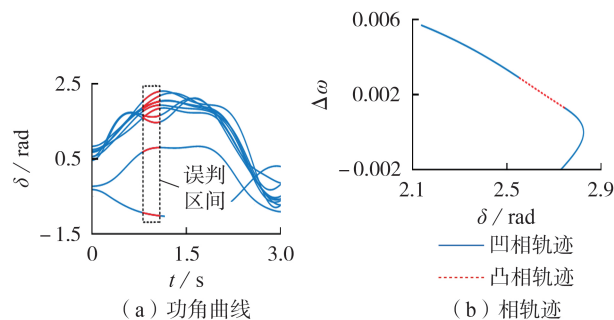


图9 临界稳定情况下的误判算例

Fig.9 Misjudgment example of critical stable case

事实上,在临界稳定场景下误启动紧急控制,尽管会付出额外的控制代价,但可以使系统的运行状态远离稳定边界,从而确保系统的稳定运行,对于实际电力系统的稳定运行而言,这种代价在一定程度上是可以接受的。

5 结论

本文明确了凹凸性判据实现的最基本算法,对其中的关键技术进行了分析与解释;然后运用该算法对IEEE 39节点系统与IEEE 145节点系统中总计64 566组算例进行了扫描。结果表明,凹凸性判据具有极低的误动与拒动率,动作正确率达到99.9%以上,即使在临界情况下的误动概率也非常低。本文还对补充的象限闭锁和严重故障辅助判据进行了分析和讨论,结果表明,象限闭锁判据可以有效降低误动率,严重故障判据可以有效提高严重故障情况下的失稳识别速度。需要注意的是,本文关注的不稳定识别判据是实现电力系统暂态稳定实时闭环控制的第一步,而基于轨迹的暂态稳定紧急控制策略的在线计算与分配方法的快速性及有效性还有待进一步大规模验证。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈国平,李明节,许涛,等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术,2017,41(10):3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [2] 汪芳宗,陈德树. 一种新的电力系统暂态稳定性在线计算方法[J]. 电力系统自动化,1994,18(5):31-35.
WANG Fangzong, CHEN Deshu. A new method for power system transient stability on-line simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(5): 31-35.
- [3] BHUI P, SENROY N. Real-time prediction and control of transient stability using transient energy function[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2):923-934.
- [4] 黄天罡,薛禹胜,林振智,等. 动态EEAC的自适应分段映射[J]. 电力系统自动化,2018,42(21):21-27.
HUANG Tiangang, XUE Yusheng, LIN Zhenzhi, et al. Dynamic EEAC with adaptive subsection mapping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 21-27.
- [5] 王怀远,陈启凡. 基于堆叠变分自动编码器的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):134-139.
WANG Huaiyuan, CHEN Qifan. Transient stability assessment method of electric power systems based on stacked variational auto-encoder[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 134-139.
- [6] WANG Liancheng, GIRGIS A A. A new method for power system transient instability detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1082-1089.
- [7] 谢欢,张保会,于广亮,等. 基于相轨迹凹凸性的电力系统暂态稳定性识别[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):38-42.
XIE Huan, ZHANG Baohui, YU Guangliang, et al. Power system transient stability detection theory based on characteristic concave or convex of trajectory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 38-42.
- [8] 谢欢,张保会,李钢,等. 基于广域发电机状态信息的电力系统暂态不稳定性实时预测[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):

- 28-32.
- XIE Huan, ZHANG Baohui, LI Gang, et al. Real-time prediction of transient instability based on wide-area information of generator state[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7):28-32.
- [9] 张保会, 杨松浩, 王怀远. 电力系统暂态稳定性闭环控制(一): 简单电力系统暂态不稳定判别原理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8):1-6.
- ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability(1): transient instability detection principle of simple power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8):1-6.
- [10] 张保会, 杨松浩, 王怀远, 等. 电力系统暂态稳定性闭环控制(二): 多机电力系统暂态不稳定判别方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9):1-6.
- ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan, et al. Closed-loop control of power system transient stability(2): transient instability detection method of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9):1-6.
- [11] 张保会, 杨松浩, 王怀远. 电力系统暂态稳定性闭环控制(三): 基于预测响应的暂态不稳定闭环控制启动判据[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):1-6.
- ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability(3): initiation criterion of transient stability closed-loop control based on predicted response of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):1-6.
- [12] 顾卓远, 汤涌, 孙华东, 等. 一种基于转速差-功角差变化趋势的暂态功角稳定辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31):65-72.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong, SUN Huadong, et al. An identification method for power system transient angle stability based on the trend of rotor speed difference-rotor angle difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):65-72.
- [13] 岑炳成, 唐飞, 廖清芬, 等. 应用功角空间降维变换的相轨迹判别系统暂态稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11):2726-2734.
- CEN Bingcheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Transient stability detection using phase trajectory obtained by dimension reduction transform of power angles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11):2726-2734.
- [14] SU F, ZHANG B H, YANG S H, et al. Study on real-time clustering method for power system transient stability assessment[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, MA, USA:IEEE, 2016:1-5.
- [15] YANG S H, ZHANG B H, HOJO M, et al. An ME-SMIB based method for online transient stability assessment of a multi-area interconnected power system[J]. IEEE Access, 2018, 6:65874-65884.
- [16] 张保会, 王怀远, 杨松浩, 等. 电力系统暂态稳定性闭环控制(五): 控制量的实时计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12):1-5.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao, et al. Closed-loop control of power system transient stability(5): calculation of control quantity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12):1-5.
- [17] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(六): 控制地点的选择[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1):1-5, 12.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability(6): control location selection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):1-5, 12.
- [18] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(七): 实现方案与控制效果[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2):1-7.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability(7): implementation scheme and control effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2):1-7.
- [19] WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Response based emergency control system for power system transient stability[J]. Energies, 2015, 8(12):13508-13520.
- [20] FAN Xinkai, ZHANG Baohui, YANG Songhao. Coordinated emergency control of renewable sources and SGs for improving transient stability[C]//The 15th International Conference on Developments in Power System Protection. Liverpool, UK:IET, 2020:1-5.
- [21] YANG Songhao, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. An accurate and fast start-up scheme for power system real-time emergency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5):3562-3572.
- [22] 任先成, 李威, 薛禹胜, 等. 互联网失稳模式演化现象及其影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21):9-16.
- REN Xiancheng, LI Wei, XUE Yusheng, et al. Unstable modes evolution and its influencing factors analysis in interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21):9-16.
- [23] 魏少攀, 杨明, 韩学山, 等. 基于相轨迹 MLE 指标的暂态功角稳定在线辨识[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16):71-79.
- WEI Shaopan, YANG Ming, HAN Xueshan, et al. Online identification for transient angle stability based on MLE index of phase trajectory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16):71-79.
- [24] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1999:23-30.
- [25] 邵振国, 薛禹胜, 陈关荣. 一种并不导致失步的滑步现象[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24):6-9.
- SHAO Zhenguo, XUE Yusheng, CHEN Guanrong. Slip phenomenon without loss of synchronization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24):6-9.

作者简介:



范新凯

范新凯(1993—),男,四川成都人,博士研究生,主要研究方向为电力系统暂态稳定分析(E-mail: fanxinkai@stu.xjtu.edu.cn);

杨松浩(1989—),男,山东莱芜人,助理教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析和控制(E-mail: songhaoyang@xjtu.edu.cn);

赵一铭(1996—),男,宁夏银川人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统安全稳定控制(E-mail: bowdtozhaoyim@163.com);

张保会(1953—),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定控制系统理论及装置、电力系统新型继电保护以及电力系统通信等(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

(下转第171页 continued on page 171)

- topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 120-125.
- [18] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 直流电网MMC拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2681-2694.
- WU Jing, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2681-2694.
- [19] 王振浩, 刘婕, 肖壮, 等. 具备直流故障清除能力的电流转移型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5795-5803.
- WANG Zhenhao, LIU Jie, XIAO Zhuang, et al. A current-transferring MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5795-5803.
- [20] 宋强, 杨文博, 李笑倩, 等. 集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6004-6013.

SONG Qiang, YANG Wenbo, LI Xiaoqian, et al. An MMC topology integrated with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6004-6013.

作者简介:



李国庆

李国庆(1963—),男,吉林长春人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和柔性直流输电技术;

杨勇(1995—),男,河南漯河人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: 244034671@qq.com);

辛业春(1982—),男,河南信阳人,副教授,博士,主要研究方向为柔性直流输电

技术、输变电设备运行状态在线检测与诊断技术。

(编辑 王欣竹)

Modified hybrid half bridge MMC with fault blocking capability

LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, WANG Tuo, DONG Qian

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to overcome the shortcoming of traditional half bridge MMC (Modular Multi-level Converter) that cannot block fault current after DC side short circuit, a MH-HB-MMC (Modified Hybrid Half Bridge MMC) with fault blocking capability is proposed, which relies on the fault blocking capability of the M-HBSM (Modified Half Bridge Sub Module) and the corresponding auxiliary circuit to realize fault current transfer and blocking. The dynamic process of MH-HB-MMC fault blocking under the condition of DC bipolar short circuit is analyzed, the parameter selection method of key device is designed, and the economy of the topology is compared. Compared with the traditional half bridge MMC, MH-HB-MMC does not need to add switching devices, but only adds some thyristors, diodes and a mechanical switch, and the on-state loss is very low. Finally, the bipolar 51-level MB-HB-MMC DC transmission model is built to verify the fault blocking ability of the proposed topology. The simulative results show that the proposed MB-HB-MMC topology can clear DC fault within tens of ms, which has good practicability and economy.

Key words: MMC; DC fault; modified topology; current transfer; fault blocking

(上接第165页 continued from page 165)

Accuracy verification of transient instability criterion based on concavity and convexity of phase trajectory

FAN Xinkai, YANG Songhao, ZHAO Yiming, ZHANG Baohui

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Previous studies have proved that the transient instability criterion based on concavity and convexity of phase trajectory is strictly established in a second-order single-machine infinite-bus system, but it is difficult to prove the correctness when extends this criterion to a multi-machine non-autonomous time-varying system. Therefore, numerous transient examples are used to verify the accuracy and applicability of the concave-convex criterion in multi-machine system. The process of transient instability identification based on concavity and convexity of phase trajectory is presented and described, which enhances the previous real-time clustering method and adds two auxiliary criterions. Then a total of 64 566 examples are scanned respectively at different power flow modes, fault locations and durations under IEEE 39-bus system and IEEE 145-bus system. The results indicate that the accuracy of concavity and convexity of phase trajectory is higher than 99.9%, so the emergency control can be started reliably, accurately and quickly.

Key words: phase trajectory; concavity and convexity; transient instability identification; fault scanning; emergency control

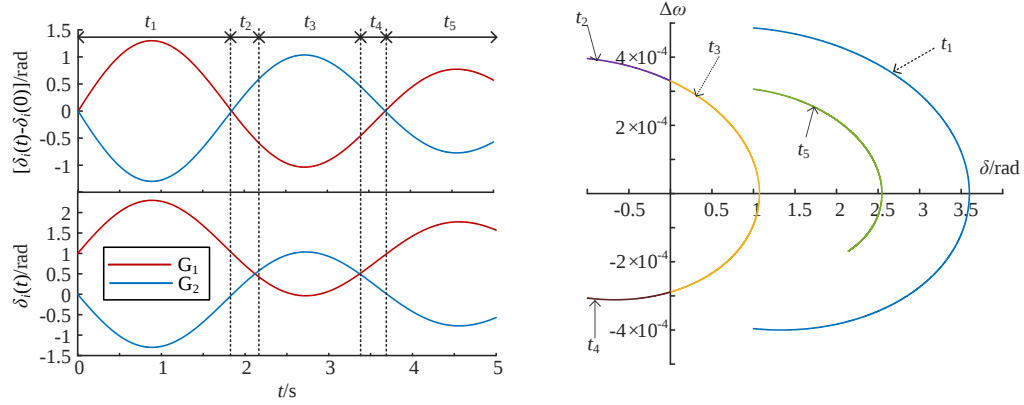
附录 A

对分群方式与象限闭锁判据关系的进一步解释如下。

根据本文提出的分群策略，当：

(1) 按照角速度分群时，超前群 S 定义为角速度较大的发电机群，滞后群 A 定义为角速度较小的发电机群，超前群聚合角速度 $\Delta\omega_S$ 一定大于等于滞后群聚合角速度 $\Delta\omega_A$ ，那么聚合单机角速度一定满足 $\Delta\omega_{eq} = \Delta\omega_S - \Delta\omega_A \geq 0$ 。即按角速度分群时相轨迹只可能位于 $\Delta\omega_{eq} \geq 0$ 的 I、II 象限。

(2) 按照功角分群时，超前群 S 定义为功角变化 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 较大的发电机群，滞后群 A 定义为 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 较小的发电机群。而在进行聚合计算时，聚合功角使用的是不减去初值的功角 $\delta_i(t)$ 。以图 A1 为例，解释可能出现的情况。



(a) 用于分群的功角 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 及用于等值聚合计算的功角 $\delta_i(t)$

(b) 聚合后的相轨迹

图 A1 按功角分群时， $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 、 $\delta_i(t)$ 的变化曲线和对应的聚合相轨迹

Fig.A1 Curves of $\delta_i(t) - \delta_i(0)$, $\delta_i(t)$, and corresponding phase trajectories when using power angles to group generators

如图 A1 所示，在大多数情况 (t_1 、 t_3 、 t_5) 下，较大(小)的 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 意味着较大(小)的 $\delta_i(t)$ ，此时聚合单机功角满足 $\delta_{eq} = \delta_S - \delta_A \geq 0$ ，轨迹位于 I、IV 象限。但是由于分群时减去了初始功角，发电机按 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 的排序并不一定完全对应按 $\delta_i(t)$ 的排序，造成聚合单机功角可能在短时间内小于 0。例如 t_2 区间内，根据 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 对发电机进行排序， G_1 应为滞后群 A，而 G_2 应为超前群 S，如图 A1 (a) 上图所示。此时，计算聚合功角时采用 $\delta_i(t)$ ，由于 $\delta_1(t) > \delta_2(t)$ (如图 A1 (a) 下图所示)，导致聚合功角 $\delta_{eq} = \delta_S - \delta_A < 0$ ，且有 $\Delta\omega_{eq} > 0$ ，此时等值的相轨迹位于第 II 象限，如图 A1 (b) 所示。但是失稳是不可能发生在这个区间的，因为 $\delta_i(t)$ 与 $\delta_i(t) - \delta_i(0)$ 具有相同的变化趋势，即 G_1 的实际功角减小而 G_2 的实际功角增大，聚合相轨迹随即进入第 I 象限 (t_3 区间)。同理， t_4 区间内相轨迹位于第 III 象限，但很快分群方式发生变化，相轨迹跳至第一象限 (t_5 区间)。

总之，按照角速度分群时相轨迹只可能位于 I、II 象限；按照功角分群时相轨迹大多数时间位于 I、IV 象限，少部分时间位于 II、III 象限，且失稳的相轨迹不可能出现在 II、III 象限。由文献[24]可知，当单机无穷大自治系统阻尼 $D > 0$ 时，功角曲线发生正向摇摆(反向摇摆)时，轨迹不可能在第 II (IV) 象限内失去稳定。因此，基于本文的分群算法，失稳的相轨迹只会出现在第 I 象限，设计 II、III、IV 象限闭锁是合理的。

附录 B

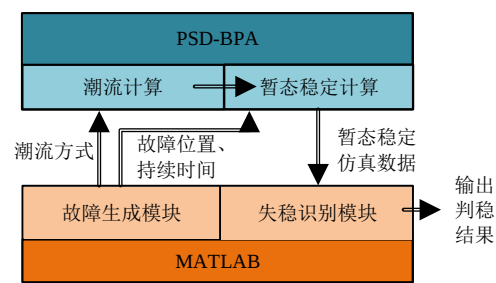


图 B1 BPA-MATLAB 交互的故障扫描和判据验证框架

Fig.B1 Framework of fault scan and TSA verification based on interaction between BPA and MATLAB

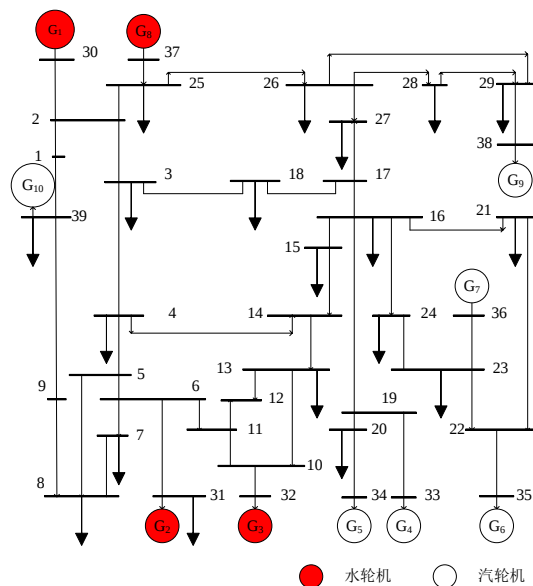


图 B2 IEEE 39 节点 10 机系统

Fig.B2 Topology of IEEE 39-bus 10-machine power system

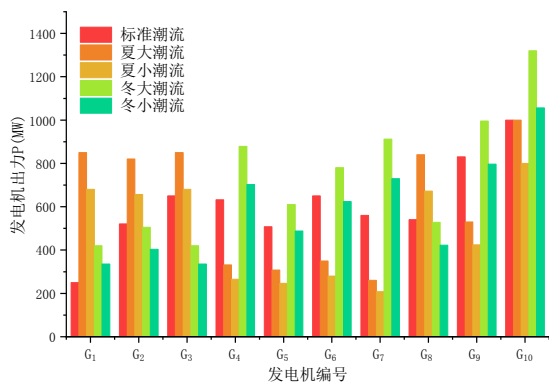


图 B3 各发电机在不同潮流方式下的出力

Fig.B3 Output power of generators under different power flow modes

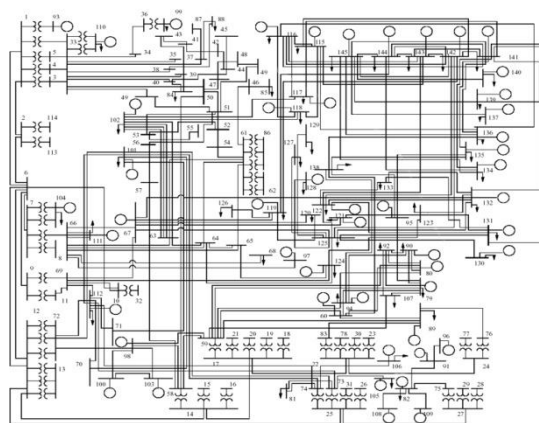


图 B4 IEEE 145 节点 50 机系统

Fig.B4 Topology of IEEE 145-bus 50-machine power system