

# 独立电力系统故障恢复现状及发展趋势

杨秀霞<sup>1</sup>, 张晓锋<sup>1</sup>, 张毅<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 从独立电力系统与陆地互联电力系统的区别出发, 较为全面地分析了独立电力系统的特点, 综述了系统的计算方法, 指出目前还没有对供电网络统一考虑的快速、有效的计算方法。总结了故障恢复的数学模型, 将其归类为多约束、非线性的组合优化问题, 归纳了上述数学模型的各种解算方法, 这些方法主要集中在启发式优化方法、传统的数学优化方法、现代随机优化方法及一些混合算法, 分析了各种方法的优缺点。在此基础上提出了今后独立电力系统故障恢复研究的方向。

**关键词:** 独立电力系统; 系统计算; 故障恢复

**中图分类号:** TM715      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)19-0074-06

## 0 引言

独立电力系统在实际运行过程中, 由于故障及其它一些意外损坏, 系统会出现停电现象, 而独立电力系统主要应用于一些重要部门或设备的供电, 如船舶、飞机等系统的供电, 这些系统对供电连续性要求非常高, 因此, 对故障后的系统及时准确进行恢复, 并使其优化运行具有重要的实际意义和应用前景。

对独立电力系统的故障恢复, 目前国内还没有详细的文献报道。本文从独立电力系统与陆地电力系统(陆地互联大电网)的区别、系统故障恢复的发展、独立电力系统计算、故障恢复的数学模型及对数学模型的各种解算方法等几方面对独立电力系统的故障恢复做一综述, 并在此基础上提出今后研究的方向。

## 1 独立电力系统的特点及其故障恢复的发展

独立电力系统的发电机容量一般都不大, 并和负载相接近, 配电网络不长, 对电网的品质要求很高。区别于大型互联电力系统, 其主要特点表现为<sup>[1, 2]</sup>:

- 1) 系统电压比较低且供电线路短, 发电机、供电线路等具有非常大的正常和故障电流, 系统的动态负载相对较多, 大型负载的启动和卸载都会对系统动态特性产生很大的影响。
- 2) 系统对供电连续性及其可靠性要求非常高。

3) 若某台发电机失电, 会对系统造成很大的影响。

独立供电系统的这些特点, 对恢复及重构系统提出了更迫切、更严格的要求。

独立电力系统的规模在不断扩大, 网络拓扑结构越来越复杂, 已发展为环形或网形供电。大型互联电力系统的故障恢复理论好多方面不适用于独立电力系统, 小型独立电力系统只提供大型断路器及开关的远程监控, 在系统出现故障后, 凭操作人员的经验采取措施排除故障, 然后恢复系统, 若出现发电机失电及过电流情况, 将会把最低优先性的同一等级负载全部卸载, 然后试合闸, 若不成功, 会继续卸载次一等级的负载。对于大型独立电力系统来说, 这样做是很不合理, 很不经济的, 系统恢复的快速性不能保障, 供电连续性也就会降低。独立电力系统的网络调度自动化是新近发展的一项能有效提高供配电系统安全运行能力及可靠性的技术, 可以执行有效的卸载, 快速对重要负载进行恢复或重构, 减少人员操作, 尽量避免人为误操作。

## 2 独立电力系统计算

系统计算可采用现成的仿真软件, 也可列写微分方程进行求解。

采用 ATP、Pspice 和 Saber<sup>[3, 4]</sup>等仿真软件, 搭建系统比较简单、直观, 但组件参数不便调整, 在应用于故障恢复时, 由于仿真软件不能提供程序接口, 因此不能在线计算, 并且大部分独立电力系统的管理软件需要自主产权。

可列写动态及稳态微分方程进行系统计算。文献[5]将陆地电力系统的节点撕裂法应用于独立电

力系统,用并行算法实现了系统仿真,列出的方程与具体系统有关,不具有算法的共性。文献[6]给出了舰船电力系统的稳态计算方法,考虑了电动机等非线性负载的建模,将发电机作为功率源,用节点电势法对系统进行计算,将电网看成由节点和节点间的支路组成,而电源和负载看成是作用在节点上的合成电流源,应用节点电压和节点功率及导纳阵之间的关系进行迭代求解。但文中没有给出在进行故障恢复时需要的网络拓扑结构的自动识别及生成方法、结构改变后系统的灵敏度计算等。系统较大时,进行矩阵的运算比较耗时,满足不了故障恢复要求的实时性。

陆地电力系统潮流计算采用牛顿法或高斯迭代法,根据节点类型,给出有功、无功功率或节点电压、相角中的两个量,在已知网络中元件阻抗值的情况下即可计算。为了加速计算,目前最常用的是一些快速解法。陆地电力系统尤其是输电系统电压非常高,线路电阻比电抗小得多,可以应用简化后的“直流方程” $P_{ij} = (i - j) / x_{ij}$ 计算,对配电系统的辐射形电网,则采用前推回代法<sup>[7]</sup>进行计算。支路开断的灵敏度分析也是在此基础上建立的,这对低电压等级的独立供电网络是不实用的。并且独立电力系统存在的动态负载比较多,需考虑其动态特性。

### 3 故障恢复的数学模型

在给出故障恢复的目标后,根据现有设备及线路的约束情况,建立问题求解的数学模型。系统恢复过程中,电力紧张,恢复的目标是有限的电力如何分配,最大限度恢复负载的供电,且保证系统的安全,如电压、频率等要在一定范围内变化<sup>[8]</sup>;输电线路比较短,短路电流要限制在继电保护范围内,且保证系统的稳定性;需要开关操作数最少,负载最平衡,其属于网络流的组合优化问题。但是由于所有负载的电量可能不会完全恢复,因此,要考虑流量的变化,考虑重要负载的尽可能恢复供电,次要负载可以卸载。

故障恢复的数学模型大体可分为网络流法和图论法。网络流法一般是将负荷按区域及性质分类,通过建立流量的等式不等式约束,求解后得到每个负荷集可恢复的电量数。而图论法则是单个负荷或负荷集的组合进行0、1求解,即每个负荷集或者能够完全恢复或者全部卸载。

文献[9,10]考虑了系统的电流、电压约束及独特的网络拓扑结构,对故障后系统的恢复给出了网

络流数学模型,但没有考虑负载的优先性及系统的动态特性如系统的稳定性、电压跌落及短路电流校验等。

文献[11]将环形供电系统分区,给出了故障后直接受影响的供电区域,恢复在此区域中进行,运用图论法,对每个负载按照优先性顺序进行恢复,模型中只考虑了电流的约束。这种方法只能用于小型系统,对大系统及多故障情况是行不通的。

不论哪一种模型,其本身都属于多约束、非线性的多目标规划问题,属于NP难类的组合优化问题。

### 4 恢复求解方法

对多目标的解决方法,比较常见的是常系数加权法<sup>[12]</sup>、模糊加权法<sup>[13]</sup>和交互式模糊满意度方法<sup>[14]</sup>。常系数加权法简单,根据实际故障位置和设备,依靠主观因素,给定系数不同的值,结果往往达不到最优。后两种方法给出目标函数的隶属函数,通过计算或与决策者交互,可得到满意的有效解。

对系统约束的处理,可给以惩罚系数或用拉格朗日松弛法;还可以先根据目标,运用优化算法得到一些方案,然后检验是否违反约束。

简化后的模型求解方法大体可以分以下4类:启发式优化方法、传统的数学优化方法、现代随机优化方法、混合算法。启发式优化方法是陆地电力系统故障恢复采用的主要方法,现代随机优化方法的优化效果比较好,但比较费时,因此在陆地电力系统恢复时不常用,而在网络重构时由于对时间的要求不太高,所以已得到广泛应用,独立电力系统规模相对要小,进行恢复时可以借鉴引用这种方法。

#### 4.1 启发式优化方法

这类方法基于人的一些直观想法建立起来,通过启发式过程实现,算法在性能方面并不要求得出最优解,只要求近似解尽可能“接近”最优解,象深度、广度搜索法<sup>[15]</sup>等就属于启发式方法。启发式恢复<sup>[15~19]</sup>采用的思路是:首先将停运的负荷区域分成几个组,成为区域组,力图按组进行恢复供电,使离故障点远的地方变动尽量少。先恢复优先级高的区域及故障优先级高的区域,根据开关的容量等排序恢复<sup>[16]</sup>。如果按区域恢复也会引起运行约束超限,则考虑将馈线的负荷进行转移,力图恢复尽可能多的负荷。对形成的每一恢复方案,用潮流计算检验是否满足约束条件。但系统在遇到多故障时,往往不容易找到最优的路径<sup>[17]</sup>。采用专家系统方法<sup>[18]</sup>,可考虑很多不同的约束,用产生式规则寻找

停电母线的恢复路径,列出开关操作步骤。其恢复速度快,应用比较广泛,但还需寻找更优更快的启发式规则。

此方法简单、直观、计算速度快,但得到的最优解或缺乏数学意义上的最优性或只是局部最优解。

对独立电力系统故障恢复,文献[11]运用启发式方法—贪婪式算法进行故障区域的重构,尽管运算简单,但不能保证最大限度地恢复重要负载的供电;文献[19]应用专家系统的方法恢复故障区域的供电,其处理恢复控制时需要建立庞大的专家知识库,且知识的全部获取也非常困难。文献[20]给出系统的故障概率,决定在某一时刻系统最多能供电的负载量。系统没有考虑重要负载的多路供电情况,对需卸载的负荷是反复试验,经过潮流计算检验是否满足约束得到的,没有给出系统且有效的方法。

#### 4.2 传统的数学优化方法

传统的数学优化方法首先建立数学模型如线性规划模型、非线性规划模型、整数规划模型、混合整数规划模型以及网络流模型等,然后用经典的数学优化技术对这些模型进行求解,例如采用单纯形法、动态规划法、梯度法、二次规划法、网络流法等进行求解。

虽然这些方法从数学的角度看具有更严格的最优性,但是除基于线性规划模型的算法外,这些数学优化方法都受到计算复杂性问题的困扰,即面临“维数灾”。为了降低计算复杂性,许多方法对问题进行了简化,例如忽略一些约束条件,将离散变量连续化等。然而,这些简化使得解的最优性得不到保障。

线性规划与二次规划理论和方法比较完善,应用面广泛,而其它非线性优化方法一般仅适用于特定问题求解。陆地电力系统潮流方程中有功与无功可以解耦,负荷有功与无功分配,可解耦为有功分配和无功调节,易于建立功率分配的线性规划模型<sup>[21]</sup>。为使系统安全水平较高,需对系统的无功进行调节,一般是建立电压调节模型,对其线性化求解。而独立电力系统的电压等级一般比较低,且需建立环形或网形供电系统,因此对功率的分配要考虑新的方法。

文献[10,11]将系统用简化的直流潮流进行计算,通过加入松弛变量,将故障恢复的数学模型简化为线性模型,且满足了对负载的辐射状供电要求。但是与实际系统相比,计算结果存在一定的误差。

#### 4.3 现代随机优化方法

在近 20 年的优化领域中,基于随机化技术的优

化方法正在迅速发展,并得到日益广泛的应用。这些方法包括:进化算法(含遗传算法、进化规划等)、模拟退火、Tabu 搜索以及与随机化技术结合的神经网络法等。实践证明这些随机化方法普遍来说具有比传统优化方法更好的全局优化能力。

##### 4.3.1 遗传算法

遗传算法是 J. Holland 于 1975 年受生物进化论的启发而提出的。它是一种通用化优化算法,其编码技术和遗传操作比较简单,优化不受限制性条件的约束,而其最显著特点是隐含并行性和全局解空间搜索。但是算法有时会出现不成熟收敛现象而陷入局优。

目前,随着计算机处理速度的提高,遗传算法在故障恢复中得到了广泛的应用。算法的编码一般结合实际问题,选取尽量少的变量进行操作,可采用浮点数、整数<sup>[22]</sup>和二进制编码<sup>[23]</sup>,甚至可以用双串编码<sup>[24]</sup>,即用一个串表示对变量的操作,另一个串表示变量值。文献[24]在求供电恢复模型时,将其与 TSP 问题相比拟,给出了克服配电网环形的编码方法,将 0 基因引入代表卸载。对交叉、复制、变异等算子的操作,要根据所要求解问题的规模 and 实际过程给出不同的控制函数,如模糊函数、自适应函数等。算子选择合适,可在很大程度上克服遗传算法的重复搜索及收敛到局部极小点的现象。文献[25]遵循不在任何环路内的支路上的开关闭合、构成同一环路的开关放在同一基因块内、相邻开关在染色体中相邻的染色体编码策略,缩短了染色体编码长度,有效提高了有效候选解的比例。

在对操作因子进行评价时,需给出一适应度函数,以决定个体的取舍。在求解适应值过程中,可以处理多目标问题及一些非线性、线性约束,这是传统的方法无法解决的。恢复时,将编码方案映射成图,识别网络结构,计算系统潮流及适应值。

##### 4.3.2 模拟退火法

模拟退火算法是基于物理退火过程与组合优化之间的相似性,由某一较高温度开始,利用具有突跳特性的 Metropolis 抽样策略在解空间中进行随机搜索。伴随温度的不断下降重复抽样过程,算法最终得到问题的全局最优解。但是为了寻到最优解,算法通常要求较高的初温、较慢的降温速率、较低的终止温度以及各温度下足够多次的抽样,因而优化过程较长,而故障恢复强调实时性,因此单纯的这种算法是不实用的。

##### 4.3.3 禁忌搜索法

禁忌搜索是对局部邻域搜索的一种扩展,是一种全局逐步寻优算法,是对人类智力过程的一种模拟。其通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态。

算法可以保证多样化的有效搜索以最终实现全局优化,但其主要问题是列表大小不易确定,太小的列表可能无法避免搜索路径的重复,这将影响 Tabu 方法的全局优化性能;太大的列表除了增加计算的时空复杂度外,还可能会因列表对搜索区域的过分限制,而使 Tabu 搜索难以接近全局最优解的近旁,从而也影响了其全局搜索能力;其编码和并行搜索能力及处理多目标及约束能力远没有遗传算法强。

#### 4.3.4 神经网络法

神经网络中用于优化计算的模型主要有两种:BP 网络和 Hopfield 反馈神经网络。

用模式识别等方法产生训练用的输入输出数据对,对 BP 网络进行离线训练,利用其非线性映射能力,在系统实际运行时,对特定的运行状态给出系统的控制策略<sup>[26]</sup>。网络的连接权值和偏值参数的学习非常耗时,而且需要大量样本,对系统的信息利用能力也不强。

Hopfield 反馈神经网络非常适合于组合优化问题的求解,已成功地运用于 TSP 问题的解决。由于可以构造梯度下降的能量函数,其能量函数极小点对应系统稳定点,可求出最小值对应的问题最优解。操作时,要使神经元的能量函数及输出与系统的约束、给定的条件及问题的解彼此对应,以构造能量函数<sup>[27]</sup>,但是,此算法非常容易陷入局优解,对大规模系统存在严重的计算时间问题。

#### 4.4 混合算法

将启发式方法、传统的数学方法与现代随机优化方法相结合或将随机优化的几种方法结合得到的混合算法,其优化性能会大大提高。

文献[28]利用最短路径法按照某一顺序为每个负荷分别寻找供电路径,然后利用遗传算法选择最优的负荷排列顺序,从而实现在局部最优解中寻求全局最优解,给出了“随机化的全局搜索策略+面向问题的局部优化算法”相结合的全局优化思想。禁忌搜索、模拟退火和遗传算法之间的结合,可充分利用 SA 的跳出局部极小的能力,Tabu 的记忆性质及邻域搜索能力和 GA 的组合并行全局优化性质,从而加快算法的寻优速度,提高全局寻优能力。文献[29]将 Hopfield 网络的收敛性与禁忌搜索的跳出局

部极小的能力相结合,克服了 HNN 的初值敏感性,达到比较好的效果。本文作者在文献[30]中提出一种基于启发式遗传算法的针对独立电力系统的故障恢复算法,将启发式恢复方法与遗传算法相结合,针对系统特点,对遗传算法的编码采用了独特的针对负荷的 0,1,2 编码,并对操作算子进行了优化,算法的收敛性和计算速度都有明显的提高,试验结果表明此方法可以很好地解决独立电力系统的故障恢复问题。

## 5 今后研究的方向

目前对独立电力系统研究还比较少,没有对供电系统统一计算的有效方法;现有故障恢复的文献对系统恢复过程中的动静态稳定性、恢复后系统的供电连续性等这些对独立电力系统至关重要的因素考虑还不全面;没有充分利用独立电力系统的特点如各种工况下负荷水平相对确定,可对各种典型工况分别处理等;一些最新的解决组合优化问题的方法如免疫遗传算法、混沌神经网络等都有了很大的发展;因此提出以下几个今后研究的方向:

- 1) 研究适合故障恢复的供配电系统计算方法。
- 2) 计及各种动静态约束,建立更完善的故障恢复模型。
- 3) 针对计算速度和收敛性、最优性 3 个方面,寻求适合独立电力系统故障恢复的实用求解方法,并且对算法的结构及参数选择等从理论上进行研究,针对实际的问题具体讨论。
- 4) 故障恢复过程中,如何有效地控制供电连续性和最优性的地位和作用。
- 5) 针对各种负荷水平,考虑故障恢复的预测性重构,是加快恢复过程、使系统结构达到最优的一个理想解决方案。

#### 参考文献:

- [1] Butler K L, Sarma N D R, Whitcomb C A, et al. Shipboard Systems Deploy Automated Protection [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1998, 11(2): 31-36.
- [2] 谢威(XIE Wei). 飞机电源负载智能分配系统仿真与研究(硕士学位论文)(Simulation and Study on Aircraft Power System Load Intelligent Distribution System, Thesis) [D]. 西安:西北工业大学(Xi'an: Northwestern Polytechnical University), 2001.
- [3] Zhang H, Butler K L. Simulation of Ungrounded Shipboard Distribution Systems in Pspice [A]. 1998 Midwest Symposium on Circuits and Systems. 1998, 8: 58-62.

- [4] Adediran A T, Xiao H, Butler K L. The Modeling and Performance Testing of a Shipboard Power System[A]. 33rd Annual Frontiers of Power Conference. 2000. 10:1-9.
- [5] 叶树江,刘金波,刘勇( YE Shur-jiang, LIU Jin-bo, LIU Yong). 船舶电力系统建模及其并行算法实现( Modeling of Ship Electric Power System and Realization of Its Parallel Algorithm)[J]. 黑龙江工程学院学报( Journal of Heilongjiang Institute of Technology) ,2001, 15(3) :57-60.
- [6] 庄劲武(ZHUANGJinwu). 舰艇电力系统稳态参数计算方法的研究( Study on Calculation Method of Shipboard Power System Static Parameter)[J]. 海军工程大学学报( Journal of Naval University of Engineering) ,2000, 5:20-24.
- [7] Hsia Y T, Chien C Y. Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy GA Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4) : 1394-1400.
- [8] Bretas A S, Phadke A G. Power System Restoration Using Artificial Neural Networks[J]. Proceedings of NAPS, 2001, 10:73-79.
- [9] Bulter K L, Sarma N D R, Prasad V R. A New Method of Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Systems[A]. Proc 1999 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf. 1999. 658-662.
- [10] Bulter K L, Sarma N D R, Prasad V R. Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4) : 653-661.
- [11] Bulter K L, Sarma N D R. General Reconfiguration Methodology for AC Radial Shipboard Power Systems[A]. IEEE 2000 Power Engineering Society Winter Meeting. 2000. 2:1226-1230.
- [12] Popovic D S, Ciric R M. A Multi-objective Algorithm for Distribution Networks Restoration[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3) :1134-1141.
- [13] 颜萍,顾锦汶,张广( YAN Ping, GU Jinwen, ZHANG Guang). 一种快速高效的配电网供电恢复算法( A Fast Efficient Service Restoration Method for Distribution Network)[J]. 电力系统自动化( Automation of Electric Power Systems) ,2000, 24(5) :52-56.
- [14] Saric A T, Calovic M S. Fuzzy Multi-objective Decisions in the Problem of Optimal Distribution Load Flow[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 58:1-9.
- [15] Zhou Q, Shirmohammadi D, et al. Distribution Feeder Reconfiguration for Service Restoration and Load Balancing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2) :724-729.
- [16] Miu K N, Chiang H D, McNulty R J. Multi-tier Service Restoration Through Network Reconfiguration and Capacitor Control for Large-scale Radial Distribution Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3) :1001-1007.
- [17] Sarma N D R, Prasad V C, Prakasa K S, et al. A New Network Reconfiguration Technique for Service Restoration in Distribution Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4) :1936-1942.
- [18] Adibi M M, Chairman, Fink F H. New Approaches in Power System Restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4) :1428-1434.
- [19] Srivastava S K, Butler Purry K L, Sarma N D R. Shipboard Power Restored for Active Duty[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3) :16-23.
- [20] Momoh J A, Zhu J Z, Kaddah S S. Optimal Load Shedding Study of Naval-ship Power System Using the Everett Optimization Technique[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 60:145-152.
- [21] 董张卓,孙启宏,张世学,等( DONG Zhang-zhuo, SUN Qi-hong, ZHANG Shi-xue, et al). 电力系统事故恢复过程中的负荷有功分配( The Load Distribution during Power System Restoration)[J]. 西安交通大学学报( Journal of Xi'an Jiaotong University) ,1998, 32(1) :1-4.
- [22] Luan W P, Irving M R, Daniel J S. Genetic Algorithm for Supply Restoration and Optimal Load Shedding in Power System Distribution Networks[J]. IEE Proc — Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(2) :145-151.
- [23] 盛四清,梁志瑞,等( SHENG Si-qing, LIANG Zhi-rui, et al). 基于遗传算法的地区电网停电恢复( Fault Restoration of Distribution Network Based on Genetic Algorithm)[J]. 电力系统自动化( Automation of Electric Power Systems) , 2002, 26(2) :57-61.
- [24] Sakawa Masatoshi, Kato Kosuke. Genetic Algorithms with Double Strings for 0-1 Programming Problems[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144 :581-597.
- [25] 毕鹏翔,刘健,等( BI Peng-xiang, LIU Jian, et al). 配电网网络重构的改进遗传算法( A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration)[J]. 电力系统自动化( Automation of Electric Power Systems) ,2001, 25(9) :53-55.
- [26] Hsu Y Y, Huang H M. Distribution System Service Restoration Using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method[J]. IEE Proc — Gener, Transm and Distrib, 1993, 8(3) :251-256.
- [27] Bouchard D, Chikhani A, John V L, et al. Applications of Hopfield Neural Networks to Distribution Feeder Reconfiguration[J]. IEEE Neural Networks to Power Systems, 1993: 311-316.
- [28] 余贻鑫,段刚( YU Yi-xin, DUAN Gang). 基于最短路算法和遗传算法的配电网网络重构( Shortest Path Algorithm and Genetic Algorithm Based Distribution System Reconfiguration)[J]. 中国电机工程学报( Proceedings of the CSEE) ,2000, 20(9) :44-49.
- [29] Jung H S, Shin D J, Kim J O. Neural-tabu Algorithm in Opti-

mal Routing of Distribution Network Considering Reliability Indices [A]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2000. 2340-2344.

- [30] 杨秀霞, 张晓锋, 等 (YANG Xiuxia, ZHANG Xiaofeng, et al). 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究 (The Study of Network Reconfiguration of the Shipboard Power System Based on Heuristic Genetic Algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23

(10): 42-46.

收稿日期: 2004-01-06; 修回日期: 2004-03-22

作者简介:

杨秀霞 (1975 - ), 女, 博士研究生, 从事独立电力系统优化及安全运行方面的研究; E-mail: yangxiuxia @21cn.com

张晓锋 (1963 - ), 男, 教授, 博士生导师, 从事独立电力系统规划、优化及安全运行方面的研究。

### Present situation and developing trend of isolated power system restoration

YANG Xiuxia<sup>1</sup>, ZHANG Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Based on the differences between isolated power system and utility large power system, the paper surveys the characteristics of the isolated system. Calculation methods of the system are analysed and the status that there is no fast and effective method to calculate supply and distribution network integrately is pointed out. Mathematical model of restoration, which belongs to a typical multirestriction and nonlinear integer combinative optimum problem is summarized. Its solving algorithms are summarized, which mainly consists of heuristic optimization method, traditional mathematical optimization method, modern random optimization method and some mixed methods. The advantages and disadvantages of these methods are compared. Finally, the direction of future research of the isolated power system restoration are proposed.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2003ABA050).

**Key words:** isolated power system; system calculation; restoration

(上接第 63 页 continued from page 63)

安全稳定运行,使机组在保障暂态稳定性能的前提下,提高了动态稳定性能。同时,电力系统稳定器 PSS 按照优化参数整定后投入运行,也大大提高了发电机组并网运行的动态稳定性能。

参考文献:

- [1] GB/T 7409.1~7409.3, 同步发电机励磁系统 (Excitation

System of Synchronous Generator) [S].

收稿日期: 2004-05-31; 修回日期: 2004-06-30

作者简介:

王建成 (1954 - ), 男, 从事继电保护、机组动态稳定的研究工作。E-mail: Wangjc @npqjvc.cn

### Analysis and countermeasures on fluctuation of 650 MW generator of Qinshan nuclear power plant

WANG Jian-cheng

(Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

**Abstract:** The 2 × 650 MW turbo generator units of Qinshan nuclear power plant are always operated over its rated power and the plant power system always gives flash alarms while the offsite power system fluctuates instantly. All these threaten the safety operation of nuclear power plant. Based on the simulation test, modeling and optimizing the parameter of excitation adjuster, the PSS (power system stabilizer) is put into operation. The assess of AVR capability in the course of unit startup and the assess of 500 kV system singlephase earthing fault show that the damp characteristic and the stabilization are enhanced distinctly.

**Key words:** electric power system; nuclear power unit; PSS