

# 微电网黑启动关键问题分析

王琳

(铁岭师范高等专科学校, 辽宁 铁岭 112008)

**摘要** 微电网在脱离大电网孤立运行时, 可能会引起故障造成停运, 在这种情况下微电网黑启动是指不依靠其他网络的帮助, 通过微电网内部具有黑启动能力的微电源带动不具有黑启动能力的微电源, 实现微电网重新启动恢复供电的过程。在微电网的黑启动过程中, 仍然存在着一些大电网黑启动中的常见问题, 如过电压、发电机的自励磁等, 本文将对微电网黑启动状态下的关键问题做出分析说明。

**关键词** 微电网 等效模型 黑启动

中图分类号: TM4

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2021)05-0007-03

## 1 前言

电网黑启动, 是指整个系统因外部或内部故障停运后, 不依靠其他网络的帮助能够通过系统中有自启动能力的机组带动不具有自启动能力的机组, 逐步扩大恢复范围实现整个电力系统恢复正常供电的过程<sup>[1]</sup>。这一概念同样适用于孤立运行的微电网。微电网黑启动, 是指整个微电网因故障停运后, 不依靠其他网络的帮助, 通过微电网内部具有黑启动能力的微电源带动不具有黑启动能力的微电源, 实现微电网重新启动恢复供电的过程。

当孤立运行的微电网发生故障并引起瘫痪使系统不能正常运行时, 若能够高效安全地使系统恢复供电, 对保证系统供电可靠性和减少因中断供电给用户带来的损失非常重要。黑启动是解决这一问题的关键, 尤其在黑启动初期对系统能否自启动成功具有非常重要的意义<sup>[2]</sup>。下面对微电网中黑启动的技术难点进行分析, 介绍了产生过电压、自励磁现象的原因, 以及其对黑启动恢复速度的造成的影响, 为黑启动技术方案的选择提供依据。

## 2 过电压问题

### 2.1 过电压的产生

在实际运行中, 微电网不可避免的会受到如雷电、开关操作等因素的影响, 使得微电网系统中的运行电压的值可能会高出额定电压, 系统中出现的这种情况是电磁扰动引起的。一般在黑启动时, 一些柴油发电机、燃气轮机等会成为黑启动的启动机组, 那些受不稳定因素影响的光伏源、风能源等一般作为被启动的机组<sup>[3]</sup>。通常情况下, 当启动机组与被启动机组距离较远且线路较长时, 就会产生过电压。因此, 微电网系统中的电气设备不仅要在额定电压内能够正常工作, 还应该有一定的能够承受过电压的能力, 这样才能更好的使孤立微电网能够维持正常运行。

微电网中的过电压有两种常见形式: 操作过电压和稳态过电压<sup>[4]</sup>。其中, 操作过电压指的是微电网系统中一些开关操作或者继电保护元件故障时做出跳闸动作的情况下

产生的过电压。稳态过电压包括工频过电压和谐振过电压, 其中谐振过电压则是微电网系统中存在的一些震荡回路产生的振荡现象, 而工频过电压通常是由于微电网系统运行过程中某些轻载线路存在充电电流造成的。

微电网黑启动状态下的过电压问题是一个不可忽视的重要因素。为了能够高效安全的抑制微电网系统中的过电压情况, 就要首先了解其产生的原因并且能够较准确的预测出过电压的最大电压值, 这样才能在系统黑启动时保证系统中每个用电设备的正常运行, 使得系统能够成功的恢复到正常运行状态, 下面分别对上述几种情况进行分析。

### 2.2 工频过电压

微电网中的工频过电压, 就是在微电网黑启动的过程中对空载或轻载的线路空充时, 微电网中本身存在的电容产生的无功使系统电压增大的现象。工频过电压属于微电网内部存在的稳态过电压, 它存在时间的长短影响着系统中对过电压装置的保护和绝缘设计的要求。

微电网中的电容效应指的是微网中的电力输电线路存在很多的电感、电容元件, 并且通常容抗值比感抗值要大, 当系统中电源供电时, 系统中会产生容性电流, 这个电流会使它流过的容抗电压和感抗电压的方向相反, 这使得容抗电压大于电源电势。微电网系统中的工频过电压影响着很多因素, 例如设备绝缘水平、电路保护措施和设备能否正常运行等。因此, 我们需要高度关注工频过电压对系统造成的影响。

微电网的空载电力线路, 可视为由无数个电感电容元件组成的回路构成的。电容效应使得线路中各个节点的电压和比电源电势高, 从线路首端到末端总电压逐步升高, 线路最末端的电压值最大。下面带有空载线路的微电网系统进行研究, 等效电路如图1所示。

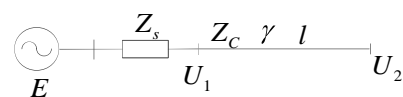


图1 空载线路等效电路图

在图1中,  $Z_s$  为微电源的等效阻抗,  $Z_l$  为线路的等效阻抗,  $\gamma$  为线路的传播系数,  $l$  为线路长度, 空载线路末端电压值受多个线路参数的影响。我国的有关标准规定在超高压线路中, 工频过电压的值不允许超过其对应相电压的1.4倍。微电网系统中虽然不涉及超高压线路, 但是在进入到黑启动状态的过程中, 为了防止工频过电压对系统造成影响, 应按照以上计算结果对线路参数进行合理的配置, 以确保黑启动的顺利完成。

### 2.3 操作过电压

微电网的操作过电压通常发生在系统短路故障中, 多在黑启动状态时开关操作的过程中产生, 此电压是暂态的, 且衰减速度快。微电网系统的操作过电压产生的常见情况如下: 空载合闸时容易产生过电压; 切除空载线路时也极易产生过电压。

在微电网的黑启动过程中, 空载合闸情况极易引起过电压, 且多由于人为操作而产生, 计划性较强。微电网中的空载线路在合闸前电压为0, 合闸后上升到基波稳态电压, 此过程中会产生合闸过电压。合闸过电压持续时间不长, 但能够产生较大的冲击电压, 此冲击电压如果大到一定值, 会使断路器发生动作对微电网系统进行保护, 不能够成功合闸。如果此电压冲击过大, 则会导致系统中设备损坏, 甚至设备绝缘有可能被击穿。在空载合闸时受影响最严重的就是空载线路的末端, 因此我们只要检测末端电压即可。微电网系统中空载线路的等效模型如图2所示。

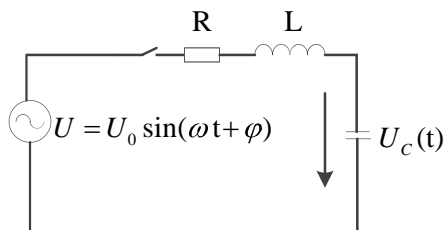


图2 T型等效电路

合闸前的系统是稳定的, 电容的电压初值一般是0。合闸瞬间, 电容处于充电状态, 电容与电感在合闸产生一个高频震荡回路, 因此产生过电压。所以, 在微电网黑启动过程中, 应该使系统能够承受此电压值。

综上所述, 为了防止微电网黑启动过程中过电压对黑启动产生影响导致启动失败, 通常采取以下措施:

- (1) 在线路的末端加装避雷针或高压并联电抗器等设备;
- (2) 变压器绕组加装低压电抗器, 能够控制过电压的幅值;
- (3) 降低母线电压值。

### 3 自励磁

当微电网系统中有容性负荷且达到一定值时, 产生助磁并引起微电网中发电机电压的升高, 而发电机电压的升高又会增大容性负荷的助磁, 如此关系类似正反馈, 发电机电压会越来越大。作为黑启动微电源的发电机, 例如本

文中的柴油发电机, 会与空载长线路连接, 线路中的对地电容相当于容性负荷, 如果此负荷大到一定值时, 必然会引起发电机电压的升高。发电机自励磁的特点如下:

(1) 不需要单独加电源为共振提供能量, 由发电机提供即可。在自励磁发生的开始阶段, 如果共振回路中有剩余的能量, 例如发电机的转子切割磁感线的过程中会产生少量感应电压, 或者微电网电力线路中的电容中残留微量电压, 都可以使自励磁共振持续进行。

(2) 在实际微电网系统的电力线路中电阻存在着损耗, 每次在设备参数发生变化时都会引起较大的能量, 这部分能量可以抵消补偿电阻中的能量损耗, 并随着共振的过程积累的越来越多, 造成更严重的自励磁现象。

(3) 自励磁现象发生之后, 随着电路中电流的增加, 电感线圈达到磁饱和状态, 电感会迅速减小, 使系统脱离共振条件, 这样自励磁的电压和电流值会趋于平衡达到稳定值, 避免无限制增大。

微电网黑启动过程中遇到长距离输电时, 电容效应容易引起自励磁现象的发生, 导致微电网系统中部分节点电压过高, 使逆变器和用电设备的绝缘安全受到威胁, 这是一种极其不稳定的状态。因此, 在制定微电网黑启动方案时, 为了避免自励磁现象的发生, 需要研究自励磁发生的条件。

根据同步发电机的特性可知, 自励磁发生的条件是输电线路的特性曲线和发电机的充电特性曲线存在交点。当两曲线相切时只有一个交点, 此时  $X_c = X_d$ , 是自励磁发生的临界条件。当  $X_c > X_d$  时, 输电线路的特性曲线和发电机的充电特性曲线没有交点, 此时不能够发生自励磁; 当  $X_c < X_d$  时, 输电线路的特性曲线和发电机的充电特性曲线有交点, 则会发生自励磁。

在微电网系统中, 发电机是经过变压器与空载线路相连的, 产生自励磁的条件应当改为  $X_c < (X_d + X_T)$ , 其中  $X_T$  为变压器的漏抗。在实际使用过程中, 由于发电机、电力线路以及变压器等设备的参数存在一定的误差, 应留有一定的裕度, 通常情况下应留有20%的容量, 即自励磁发生的条件可以改为  $X_c < 1.2(X_d + X_T)$ 。

根据自励磁的发生条件判据可知, 自励磁是否发生以及自励磁产生之后端电压的大小, 归根结底是  $X_c$ 、 $X_T$ 、 $X_d$  的比较,  $X_c$  比  $X_d$  小的越多, 自励磁的端电压越大, 因此可以据此分析出自励磁的影响因素:

- (1) 发电机电抗值过大引起自励磁;
- (2) 输电线路长度增加或者采用分裂导线, 导致自励磁现象的发生;
- (3) 运行频率升高引起自励磁现象。

如果在黑启动的初期, 黑启动电源通过空载长线路向机组充电的过程中发生自励磁现象, 则难以控制发电机的电压, 可能导致某些节点电压超过允许值, 引起线路中的电气设备保护动作, 致使黑启动失败。因此, 在研究以上判据的基础上, 需要对自励磁进行防范和抑制。针对上述的影响因素, 制定下面的限制措施:

(下转第11页)

成多个逻辑虚拟机来实现多个逻辑资源的利用,这使得物理机的数据处理负荷加重,云容量变少,响应时间减慢。为此,需要设计一种反应速度更快,效率更高的数据存储方案。目前,国内的技术已经足够支持高效供电数据存储方案的开发。建设有数据库的物理存储空间和位置来存放各类供电过程中产生的数据,设计人员首先开通 CloudTable 存储平台,填写部门地址,选择需要的性能和存储空间,调整好 CloudTable 网络配置创建虚拟私有云界面和 OBS 桶,用做自动化平台的基础。在使用 Hadoop 这一分布式系统架构开发分布式存储系统和业务系统。

设计人员可通过在所有的变电器终端设备上安装 VMware 开发软件,在物理机上部署 ESXi 系统,并通过 VMware vSphere Client 客户端对物理机和虚拟机进行统一管理。同时让数据库的底层硬件资源以 x86 变电器终端设备进行部署,内部数据以交换方式堆叠 2 个万兆交换机,外部数据以独立访问交换形式堆叠 2 个千兆交换机。然后按照数据库需要进行封装和订制开发,这样系统将会具备强大的算力和良好的云容量,实现高效化数据处理。<sup>[6]</sup>

#### 4 结语

综上所述,在国民经济高速发展的背景下,电力企业必须要提升供电质量,了解当下供电工程中出现的供电故障,还需要考虑到断电对大众生活工作造成的影响,为了提升供电系统输电的稳定性,必须对供电系统进行科学的监管,采用配电网自动技术进行自动监测是大部分供电企业频繁使

用的方法,可以掌握配电网实时运行状态,借助配电网自动化技术掌握配电网运行数据,并根据掌握的数据进行综合分析,凭借系统分析数据,完成配电网自动化管理工作。

自动化技术在电力系统中的应用,可以借助线路自动监测设备,充分了解供电线路的运行情况,利用自身的优势分段供电,降低供电故障的概率。因此,配电网自动化技术的积极应用,不仅可以提高配电网的安全性和可靠性,实现电力系统管理的一体化发展,而且可以高度集成各种现代技术,以适应供电监管的不断变化的要求,解决配电网的安全问题电力建设与经济建设的矛盾,为电力系统提供稳定的空间和完整的运行空间可靠性和稳定运行。

#### 参考文献:

- [1] 叶剑. 关于电力系统配电网自动化通信的网络安全管理问题探究 [J]. 科学技术创新, 2019(36):99-100.
- [2] 张楠. 配电网自动化在电力系统中的应用 [M]. 北京: 华北理工大学, 2019.
- [3] 卢勇, 余静. 电力系统配电网自动化建设技术要点分析 [J]. 通讯世界, 2019(26):214-215.
- [4] 聂强. 电力系统中的自动化技术应用 [J]. 集成电路应用, 2019(36):82-83.
- [5] 张忠稳. 试析电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 科技风, 2020(17):198.
- [6] 温江胜. 初探电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 电子世界, 2020(01):183-184.

(上接第 8 页)

- (1) 使用并联电抗器增大发电机电抗值;
- (2) 采用多台发电机带动一条大容量的输电线路;
- (3) 降低运行频率。

#### 4 微源的黑启动速度

微电网黑启动状态下的变压器建立电压过程中,由于微电源动态响应速度快,母线电压幅值增加过快可能会导致配电变压器出现磁通饱和的现象使其励磁电流过大,容易发生停机故障。因此,对调节时间  $T_s$  的取值需要加以约束。

变压器的电压与启动时间的关系如下:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{U_m}{T_s} t \cos(\omega t + \alpha) & t \in [0, T_s) \\ U_m \cos(\omega t + \alpha) & t \in [T_s, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

为保证在任意时刻铁心剩磁都不饱和,应该满足  $T_s > \frac{10}{\omega}$ , 这一结果限制了黑启动微源启动速度,因此在微电网黑启动过程中,应充分考虑到微电源的黑启动时间问题,以便正确选择黑启动方案。

#### 5 总结

微电网黑启动主要是针对系统发生故障进入全黑状态时,系统能够自行恢复断电,但是如何判断微电网是否处

于断电状态,是微网黑启动中的常见问题。微电网系统一般是利用传感器对微电网母线电压进行检测,根据不同的微电网系统设立不同的电压值作为判断条件,当检测到的电压值小于此设定值时,认为微电网处于断电状态,立即发送指令给控制中心,采用黑启动程序自行恢复供电。

与微电网的正常运行状态供电不同,微电网黑启动是一个由低电压向高压电的逆向过程,对于过电压、自励磁、黑启动恢复时间等问题是黑启动过程中必须要慎重考虑的问题。本文简明扼要的分析了以上三个问题的产生、判据、所能造成的危害以及相对应的防范措施,为黑启动第一阶段的顺利进行提供了理论支持和技术保障。

#### 参考文献:

- [1] 王敏, 李想, 潘永春, 陈芬, 茅鑫同. 微电网黑启动研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 36(03):41-45.
- [2] 杨苹, 许志荣, 郑群儒, 曾智基, 周少雄, 尹旭. 复杂拓扑结构光储型微电网黑启动策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15):142-149.
- [3] 刘坤. 基于分布式发电的微电网黑启动设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2016, 39(13):140-144.
- [4] 黄杏, 金新民, 马琳. 微网离网黑启动优化控制方案 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(04):182-190.