

# 计及电网负荷的发电机自励磁动态过程及相关问题

滕予非,丁理杰,张华,汤凡,魏巍  
(四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

**摘要:**对考虑负荷情况下发电机自励磁动态过程进行了分析。分析结果表明,当发电机带长线路的孤网内存在负荷时,由于负荷对发电机转速升高有限制作用,系统过电压不会上升到饱和点,从而对系统中的设备起到了很好地保护作用。同时发现,孤网系统内的最小负荷对自励磁抑制措施也会产生相应的影响。建议在制定相关措施时,需根据本地最小负荷进行校验。

**关键词:**自励磁;有功负荷;抑制措施

**Abstract:** The dynamic process of generator self-excitation is analyzed considering the effect of active load in the system. The analysis results show that, when there is the active load in the isolated grid which contains the generator and the unload long transmission lines, the overvoltage of the system caused by self-excitation can be limited obviously, because the rotating speed of the generator can be limited by the load. Therefore, the equipment in the system can be protected. Meanwhile, the minimum load in isolated grid has the effect on the restraining measures of the self-excitation too. It is suggested that the local minimum load should be considered when drawing up the measures.

**Key words:** self-excitation; active load; restraining measures

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0087-05

随着四川电网的发展,边远藏区的孤立电网开始逐渐接入四川主网架。但由于这些孤立电网往往远离负荷中心,在建设的初期,这些电网与主网之间往往仅通过一回联络线相连,而且该联络线的距离一般都较长。一旦由于开关偷跳等原因,出现联络线主网侧断路器跳开的情况,小网内原来的小型发电机组就会在长联络线对地电容电流助磁作用下产生自励磁,严重的影响设备与负荷的安全。

长期以来,有大量的学者对电力系统自励磁现象的机理进行了深入的研究。文献[1]对自励磁现象进行了详细的分类,并给出了每种自励磁的产生条件。同时,大量的文献也通过特征值分析法<sup>[2,3]</sup>、频域分析法<sup>[3]</sup>以及状态空间法<sup>[4,5]</sup>等数学方法对自励磁现象进行分析。在自励磁现场及抑制策略方面,文献[6]利用理论计算与仿真的方法分析了特高压线路引起机组自励磁的现场,并提出利用MOA材料抑制自励磁的方法。文献[7]则分析了频率对自励磁的影响。

然而,以上的分析往往考虑的是黑启动或者是水电长距离传输的情况,采用的是发电机组空载带长输电线路的模型,而没有考虑发电机所在的孤网

内负荷的特性。因此,许多文献都提出发电机出现自励磁时电压理论上可以升到无限值,仅仅因为实际存在磁路饱和,电压不会无限升高<sup>[8]</sup>。

然而,当发电机所在的孤网存在负荷时,这些负荷的电压静特性将对发电机的转速产生影响,从而达到抑制自励磁电压的效果。对计及孤网内负荷情况下发电机组自励磁的动态过程进行了分析,提出在制定自励磁抑制措施时,应考虑孤网内最小负荷的观点。

## 1 发电机自励磁产生机理及抑制措施

自励磁现象是指当发电机所带的容性负荷达到某一指标后,回路中的容性电流所产生的助磁会使发电机的端电压快速增大,而升高的发电机电压又引起容性电流的增长,正反馈作用使机端电压自发增大、越来越高,从而对设备安全造成威胁的现象。因此在孤网远距离并网、水电厂长距离外送以及电网黑启动情况下,均应对发电机的自励磁现象进行校核,从而制定相应的抑制措施。

由文献[9]可知,发电机带空载线路带空载长

线不发生自励磁的判据为

$$W_h > Q_c^* x_{d^*} \quad (1)$$

式中,  $W_h$  为发电机容量;  $Q_c$  为线路富余充电功率, 为计及了系统高压电抗器、低压电抗器以及低容补偿后的综合充电功率;  $x_{d^*}$  为系统等值同步电抗的标么值, 为计及了发电机同步电抗、升压变压器电抗与线路电抗的综合同步电抗。

由此可见, 为了抑制自励磁的发生, 往往可以采用在线路中投入高压电抗器、低压电抗器等感性无功补偿装置, 对线路中的充电功率实现过补偿。

## 2 计及电网负荷的发电机自励磁动态过程

### 2.1 分析系统

为了说明概念, 特采用一个简单的分析系统如图1所示。

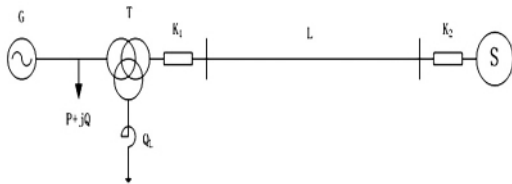


图1 分析系统示意图

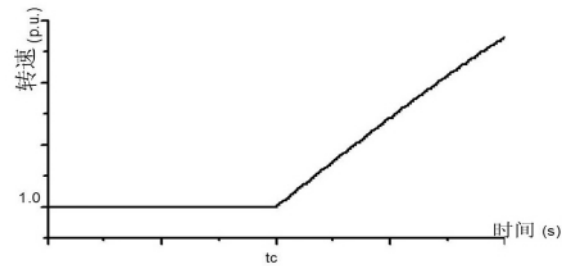
图中,  $G$  为小网系统等值的发电机组。  $P$ 、 $Q$  为小网内等效的有功及无功负荷, 为简化分析, 可等效为恒阻抗负荷。  $Q_c$  为等效的是小网侧变电站内所投入的感性无功补偿装置, 用以补偿输电线路的充电功率。  $L$  为长联络线路。而  $K_1$ 、 $K_2$  则为联络线路两侧变电站内的开关。由图1可知, 在某时刻  $K_2$  断路器因某种原因跳开后, 小网发电机  $G$  将可能在线路  $L$  充电功率的作用下出现自励磁风险。

### 2.2 系统欠补偿时发电机自励磁动态过程

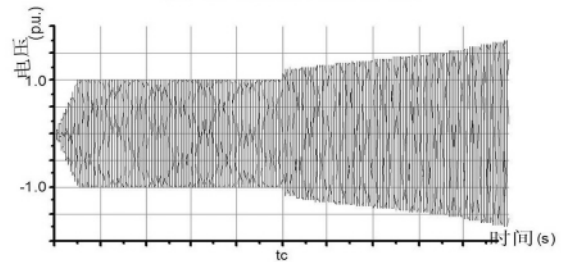
当  $K_2$  断开后, 若孤网系统因配置低压电抗器、高压电抗器容量不足而在  $50\text{ Hz}$  下处于欠补偿状态, 当孤网系统无负荷时, 可以得到发电机机端电压及转速变化如图2所示。由图2可知, 在  $t = t_c$  时刻, 当小机组与长线路形成孤网时, 如果没有当地负荷, 发电机的转速将持续的上升, 直至发电机自身过速保护动作。在此期间, 发电机机端电压也因线路容性电流的助磁作用而持续上升, 直至设备饱和。

而如果发电机所在的孤网内存在着有功负荷, 其转速、电压变化曲线则会发生明显的变化, 其变化

曲线如图3所示。

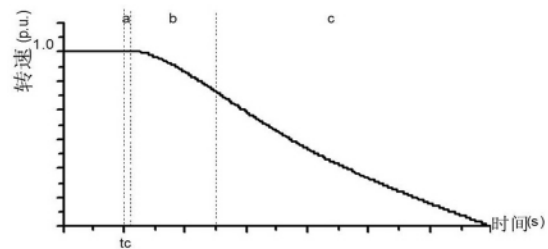


(a) 发电机转速响应曲线

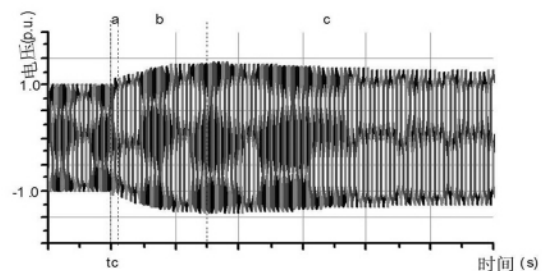


(b) 发电机机端电压变化曲线

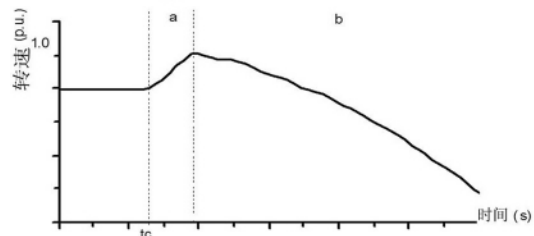
图2 欠补偿无负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线



(a) 发电机转速响应曲线



(b) 发电机机端电压变化曲线



(c) 发电机转速响应曲线 a 阶段局部放大图

图3 欠补偿有负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线

由图3可知, 当孤网系统内存在有功负荷时, 发电机机端的电压不会上升至饱和点, 而是达到一个较低的电压水平后回落。分析其原因, 可以将  $K_2$

开关断开后的过程分为如下3个阶段。

阶段1: 该阶段转速局部放大图如图3(c)所示。该阶段由于开关K2断开, 发电机输出有功减少, 因此发电机开始加速。同时由于系统处于欠补偿状态, 发电机开始自励磁, 因此机端电压也开始有所上升。由于机端电压的上升, 孤网内有功负荷根据其静特性也开始增加, 直到当系统内负荷增加到与发电机机械功率 $P_m$ 相等, 该阶段结束。

阶段2: 当系统内负荷增加到与发电机机械功率 $P_m$ 相等后, 由于系统仍处于欠补偿自励磁阶段, 因此系统电压持续升高。但是, 由于负荷的有功已经超过发电机原动机的机械功率, 发电机开始减速。同时, 随着频率的减小, 系统中感性无功开始增加, 容性无功开始减小。

阶段3: 当发电机减速到临界频率 $f_c$ 时, 系统中感性无功开始大于或等于容性无功, 由欠补偿变为过补偿。自励磁阶段结束, 发电机机端电压开始减小。从此之后, 发电机的转速及机端电压响应曲线则由发电机及控制器参数决定。

由以上的分析可知, 即使系统一开始处于欠补偿状态, 但如果孤网系统内有有功负荷的存在, 发电机机端电压不会达到饱和值, 而会在负荷静特性的影响下, 达到一个最大值后回落。该最大值出现在发电机转速降到临界频率 $f_c$ 时, 在该频率下, 系统处于完全补偿状态, 即

$$2\pi f_c L_s = \frac{1}{2\pi f_c C_s} \quad (2)$$

式中 $L_s$ 、 $C_s$ 分别为系统中电感与电容。

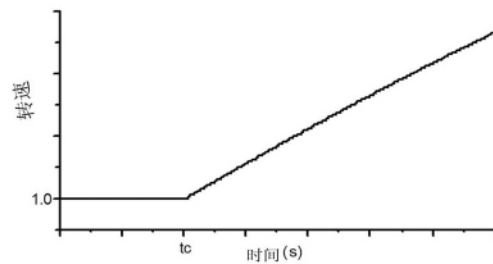
### 2.3 系统过补偿时发电机自励磁动态过程

为了防止自励磁的发生, 很多系统常常利用配置高压电抗器、低压电抗器的方式实现过补偿。但是, 由于发电机组在失负荷后会产生升速, 则极有可能将过补偿变为欠补偿, 实现自励磁。

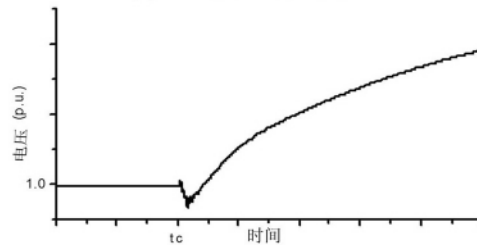
图4所示是孤网系统过补偿时, 系统中无负荷情况下, K2开关跳开后, 发电机转速与电压的变化曲线。由图4可知, 由于系统处于过补偿状态, 因此在 $t_c$ 时刻, 发电机甩负荷后, 机端电压有所下降。然而, 由于发电机功率不平衡, 孤网内频率持续上升, 系统由过补偿转为欠补偿, 发电机再次进入自励磁区域, 机端电压持续上升。

而当孤网系统内存在着有功负荷时, 负荷的存在可以限制发电机转速的上升, 避免发电机进入自励磁区域。即使发电机进入自励磁区域, 也能迅速

的将转速拉低。在该情况下, 发电机转速、电压变化曲线如图5所示。

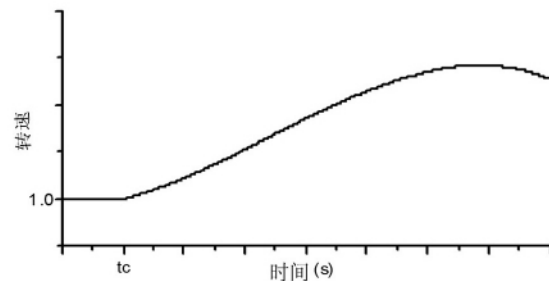


(a) 发电机转速响应曲线

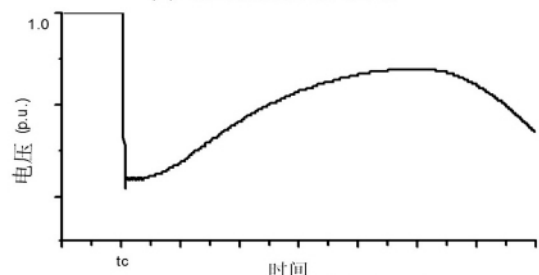


(b) 发电机机端电压有效值变化曲线

图4 过补偿无负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线



(a) 发电机转速响应曲线



(b) 发电机机端电压有效值变化曲线

图5 过补偿有负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线

### 2.4 小结

由图5可知, 由于负荷的存在, 发电机转速上升受到了明显的限制, 系统没有进入欠补偿区域, 因此发电机机端电压没有出现过电压的情况。

由以上两种情况的分析可知, 孤网中存在着有功负荷的存在可以通过限制发电机转速升高的方式, 避免系统进入自励磁区域, 或者很快的将系统从欠补偿区域中拉出, 防止系统长时间处于过电压状态, 对

系统中的设备起到了很好的保护作用。

同时,以上的分析仅考虑了有功负荷的作用,如果当地存在着感性无功负荷,相当于增加了系统的补偿度,对抑制发电机自励磁效果更加明显。

### 3 考虑负荷特性后系统自励磁的抑制措施

#### 3.1 措施配置方案

由以上的分析可知,当孤网系统不存在负荷时,无论系统处于欠补偿还是过补偿状态,随着系统频率的增加,系统最终均会进入自励磁区域,而产生极高的过电压。此时,必须通过发电机超速保护、高电压保护等装置对发电机的转速和机端电压进行限制。而系统中感性无功装置的配置,应该保证发电机在可能出现最高转速的情况下依然处于过补偿状态。

然而,当孤网内存在负荷的情况下,发电机的转速和电压均会得到明显的限制,此时可以考虑减少感性无功的补偿度,甚至不装设高压电抗器、低压电抗器等补偿装置,以提高系统的电能质量。而高压电抗器、低压电抗器的装置容量则应配合当地的最小负荷进行校验。

#### 3.2 算例分析

以四川藏区某规划系统为例,探讨最小负荷对系统自励磁抑制措施的影响。该系统简化模型如图6所示。

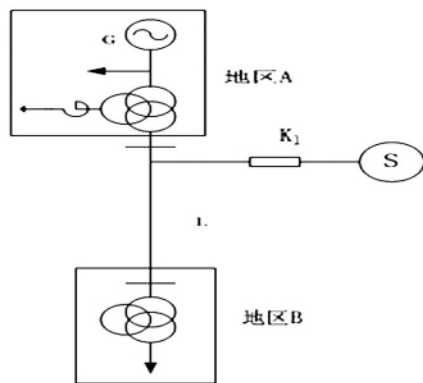


图6 算例系统

图6中,地区A与地区B均为小地区网络,当地电压等级均为35kV。两个地区经变压器升压后,利用一回220kV的输电线路相连。线路长度为69km,型号为LGJ-400。同时,地区A在本地变电站220kV侧与四川主网S相连。

图中A地区有多个小水电厂,并可等效为一台容量为8MW的发电机。而B地区则仅为负荷站,

没有机组上网。根据自励磁概念,当A地区与四川主网之间的开关K1断开后,A地区、B地区以及之间的输电线路则形成孤网,输电线路的充电功率则可能造成A地区机组自励磁而产生过电压。

以下将针对A、B地区无负荷以及A、B地区最小6MW负荷两种情况,对抑制自励磁的措施进行分析。

#### 3.1.1 A、B地区无负荷

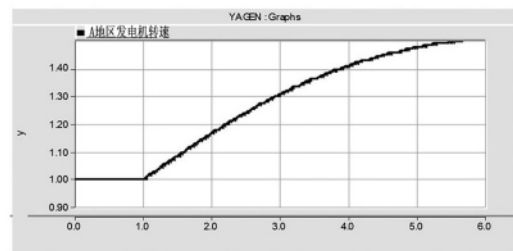
根据小机组自励磁发展的规律,建议对整个线路采取过补偿的策略。由于西地—牙根采用LGJ-400型号的输电线路,输电长度为69km。假设输电线路的几何均距为5.5m,可以得到线路每公里的电纳为

$$B = 2.92 \text{ S/km} \quad (3)$$

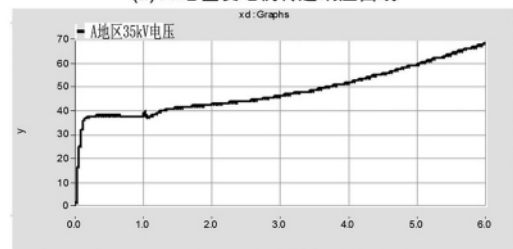
因此,对于一条69km 220kV的输电线路而言,整条线路的充电功率 $Q_c$ 为

$$Q_c = U_N^2 B l = 11.96 \text{ Mvar} \quad (4)$$

为了实现系统过补偿,在A地区变电站补偿12Mvar的感性无功,此时加上变压器的励磁回路,系统实现了较大程度的过补偿。然而,当 $t = 1.0 \text{ s}$ 时,K1开关跳开后,由于发电机转速增加,系统渐渐地由过补偿变为欠补偿,发电机依然有自励磁风险。这种情况下,系统的仿真波形图如图7所示。



(a) A地区发电机转速响应曲线



(b) A地区35kV电压有效值响应曲线

图7 无负荷仿真结果

由图7所示,在两地区无负荷情况下,若仅采用感性无功配置过补偿的措施,完全无法抑制自励磁。考虑到此时自励磁是由于发电机升速造成的,因此需要利用高周切机、机组超速保护、过压保护等辅助措施。当A地区采用机组超速保护措施时,当机组转速超过1.3 p.u.时,延时0.5s跳开,系统仿真结

果如图8所示。由图8可知,当采用机组超速保护后,系统及时的切除机组,将本地区的过电压限制在了1.27 p.u. 以内,满足系统标准。由此可见,当孤网地区负荷很小时,需要同时配置感性无功及相应的高周切机保护装置,才能抑制自励磁,防止设备损坏。

### 3.1.2 A、B地区最小负荷6 MW 情况

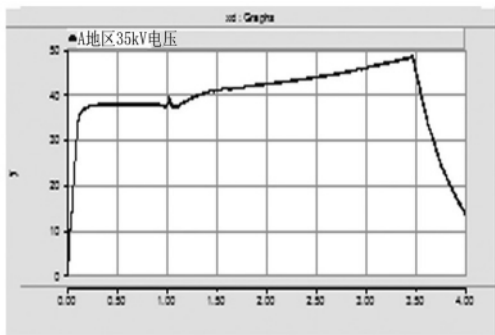
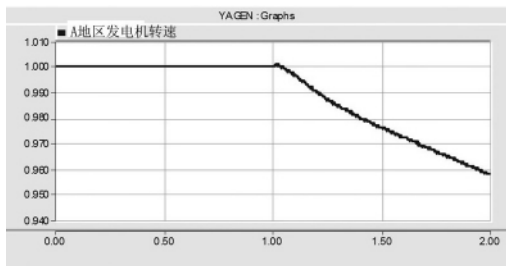
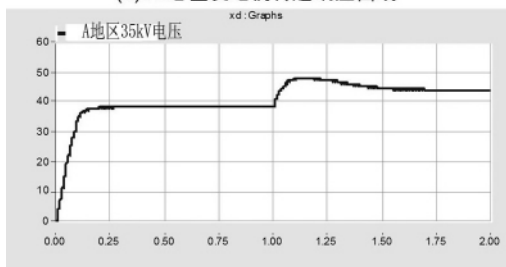


图8 采用机组超速保护后系统电压变化图

仿真结果表明,当A、B地区最小存在6 MW有功负荷时,仅需在A地区变电站补偿3 Mvar的感性无功,即可将过电压抑制在1.3 p.u. 以内,该情况的仿真图如图9所示。



(a) A地区发电机转速响应曲线



(b) A地区35kV电压有效值响应曲线

图9 有负荷仿真结果

由图9可知,当孤网地区内有较大的负荷时,少量的感性无功补偿,即可限制过电压的幅值。同时较大的负荷阻止了发电机转速的抬高,也进一步对自励磁产生抑制作用。

## 4 结论

对考虑负荷作用下高压电抗器、低压电抗器发电机自励磁动态过程进行了分析,同时对考虑负荷

情况下系统的自励磁抑制措施进行了分析,得出了以下结论。

1) 孤网中有功负荷的存在可以通过限制发电机转速升高的方式,避免系统进入自励磁区域,或者很快的将系统从欠补偿区域中拉出,防止系统长时间处于过电压状态,对系统中的设备起到了很好地保护作用;

2) 当孤网系统不存在负荷时,无论系统处于欠补偿还是过补偿状态,随着系统频率的增加,系统最终均会进入自励磁区域,而产生极高的过电压。此时,必须通过发电机超速保护、高电压保护等装置对发电机的转速和机端电压进行限制。当孤网内存在负荷的情况下,发电机的转速和电压均会得到明显的限制,此时可以考虑减少感性无功的补偿度,甚至不装设高压电抗器、低压电抗器等补偿装置,以提高系统的电能质量。而高压电抗器、低压电抗器的装置容量则应配合当地的最小负荷进行校验。

3) 由此可见,当系统中对抑制自励磁措施进行配置时,需要考虑系统本地的最小负荷。同时,在配置时,需要考虑检修及备用等情况。

### 参考文献

- [1] 蒲利春. 同步发电机自励磁产生条件的研究[J]. 四川师范大学学报:自然科学版, 1999, 6(22): 695-700.
- [2] 肖友强, 蒲利春. 同步发电机自励磁的产生条件[J]. 水电能源科学, 1999, 9(17): 19-52.
- [3] 关根泰次. 电力系统暂态解析论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] 陈闽江, 陈家庚, 丁明. 多机电力系统自励磁判定的状态分析法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 53-56.
- [5] 唐志平. 同步电机自励磁状态空间分析[J]. 大电机技术, 1999, 29(5): 34-41.
- [6] 贺家李, 贺继红, 王小玲, 等. 发电机自励磁发生根源及其对特高压输电运行的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 52-58.
- [7] 张国松, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 考虑频率波动的水电孤网发电机自励磁研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 84-87.
- [8] 张学群, 康积涛, 李林, 等. 电力系统自励磁研究概述[J]. 电力学报, 2010, 25(4): 311-314.
- [9] 陈珩. 同步电机运行基本理论与计算机算法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

作者简介:

滕予非(1984)男,博士,工程师,研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制。(收稿日期:2013-01-06)