

# 小水电站借道接入电网的自励磁分析处理

黄杉

(国电四川民和水电投资有限公司,四川成都 610041)

**摘要:** 目前进行水电流域开发的模式中,存在施工期电源电站等小水电站在后期借道干流主要发电站一同并入主网的情况,特殊情况下出现小水电站单独带长线路的运行方式。通过某流域施工电源电站接入电网的过电压电磁分析,对流域电站开发中消除自励磁提出了相应的配置措施。

**关键词:** 小水电; 自励磁; 长线路

**Abstract:** At present, in river basin development mode, the small hydropower stations such as power source stations in construction period depend on the large hydropower stations of main stream to integrate with main power grid together in later stage. The especial operating mode is the small hydropower station working with long lines alone, so the corresponding configuration measures are put forward to eliminate the self-excitation of small hydropower through the over-voltage electromagnetic analysis of a power source station during construction when accessing to power grid.

**Key words:** small hydropower; self-excitation; long transmission line

中图分类号: TM619 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0091-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.020

## 0 引言

四川省境内水电开发已经发展到远离电网主网的偏远区域。在一条河流的流域开发中为解决施工期间的施工用电问题,先期在流域上的支沟上建设施工电源电站成为一种常见的开发方式。流域开发后期,支沟小电站会同流域干流电站一同并入主网。流域干流电站装机较大,接入电网时通常不会发生自励磁现象,支沟小电站提供施工电源带施工短线路也不容易发生自励磁现象;但在流域开发后期支沟电站会通过借道干流电站长线路并网,在干流电站因为枯期、计划检修等情况全停时,会出现支沟小水电站单独带长线路的特殊运行方式,这种特殊方式下就有较大的自励磁风险。流域干流电站送出设计方案容易忽略支沟小水电站并入后在特殊运行方式下造成的自励磁问题,某些流域支沟电站规划设计数量较多,如何评估和处理支沟小水电自励磁风险需要额外重视。下面基于某支沟水电站接入电网后的自励磁计算以及过电压电磁暂态安全性仿真分析,对整个流域电站预防自励磁风险提出相应的措施建议,以便于提高流域电站和汇集送出通道的安全可靠。

## 1 自励磁过程及其校核判据

同步发电机自励磁的本质是定子电感在周期性变化中与外电路容抗参数配合时发生的参数谐振。同步发电机在孤网方式下,由于空载长线路对地电容为主要负载,发电机相当于连接一个等效容性负载,在此容性负载达到一定条件的时候,发电机即使在没有励磁电源的情况下,由转子铁心的剩磁所激发的机端电压也会逐渐升高,但在磁路饱和的约束下不会无限增大,而是稳定在某一定值。自励磁产生的过电压极易超出发电机和线路所能承受的最大限制,需要采取相应的防范措施。下面对自励磁的计算采用比较发电机额定容量与线路充电功率乘以等值同步阻抗的积作为静态校核;动态仿真采用PSCAD软件对自励磁产生的过电压进行电磁暂态分析。

## 2 案例分析报告

### 2.1 工程概况

往子沟水电站位于稻城县东义河干流下游右支流往子沟上,采用引水式开发,电站装机 $2 \times 3.7$

MW 根据国网四川省电力公司批准的东义河干支流梯级电站互联及外送规划,往子沟水电站电力送出方向为凉山州,并网点为西昌电网的500 kV水洛变电站。

电站接入方案如图1所示。往子沟电站通过35 kV线路接入色苦变电站,色苦变电站通过110 kV线路接入220 kV卡瓦变电站,卡瓦变电站汇集东义河流域约490 MW容量后通过220 kV线路接入500 kV水洛变电站。卡瓦变电站前期主要接入的是已经核准建设的益地水电站(装机 $2 \times 84$  MW)和流域施工电源电站往子沟电站。



图1 往子沟接入系统方案

## 2.2 自励磁静态计算

当系统有单机带空载长线零起升压,或正常单机带长线运行、线路末端断路器无故障三相断开等运行情况时,就可能产生自励磁过电压。卡瓦变电站汇集东义河流域电站电力送出到水洛站,线路长达55 km,而东义河流域支沟小电站较多,除了已核准的益地电站单机容量为84 MW外,其他电站单机容量多数为3~12 MW,一旦益地电站全停,很容易形成小机组带长线路的运行方式,有必要进行自励磁校核计算。

按《电力系统设计技术规程》标准,同步电机空载长线时不发生自励磁的判据为

$$W_H > Q_c X_d^* \quad (1)$$

式中: $W_H$ 为发电机额定容量,MVA; $Q_c$ 为线路充电功率,Mvar; $X_d^*$ 为发电机等值同步电抗(含升压变压器漏抗),以发电机容量为基准标么值。

根据式(1)可以看出,发电机额定容量小而等值同步电抗大,则相对容易发生自励磁;单机运行也是枯水期常见的运行方式,双机运行情况下额定容量最大而等值同步电抗最小,如果双机运行都要发生自励磁,则单机运行更容易发生自励磁,因此以下的分析都以双机运行带长线路为基础开展计算。

往子沟水电站装机为 $2 \times 3.7$  MW,功率因数为0.9, $W_H$ 为8.22 MVA。

色苦—卡瓦双回110 kV线路长18 km,导线型

号为LGJ-240,单位长度电容为 $0.009\ 04\ \mu\text{F}/\text{km}$ ,其最大充电功率为

$$\begin{aligned} Q_1 &= \omega c l U^2 \\ &= 314 \times 0.009\ 04 \times 10^{-6} \times 18 \times 121^2 \\ &= 0.748\ \text{Mvar} \end{aligned} \quad (2)$$

卡瓦—水洛双回220 kV线路长55 km,导线型号为LGJ-2 $\times$ 400,单位长度电容为 $0.011\ 8\ \mu\text{F}/\text{km}$ ,其最大充电功率为

$$\begin{aligned} Q_2 &= \omega c l U^2 \\ &= 2 \times 314 \times 0.011\ 8 \times 10^{-6} \times 55 \times 242^2 \\ &= 23.87\ \text{Mvar} \end{aligned} \quad (3)$$

往子沟发电机—变压器电气主接线采用扩大单元接线,往子沟升压变压器额定容量为10 MVA。因此变压器漏抗折算到发电机组容量的参数为

$$X_{T1}^* = 0.075 \times 8.22/10 = 0.062\ \text{p. u.} \quad (4)$$

往子沟—色苦单回35 kV线路阻抗归算到发电机组容量的参数为

$$X_{L1}^* = 0.409 \times 12 \times 8.22/37^2 = 0.029\ \text{p. u.} \quad (5)$$

色苦电站1台三绕组变压器121 $\pm$ 2 $\times$ 2.5%/38.5/10.5 kV,额定容量为40 MVA。因此变压器高—中漏抗折算到发电机组容量的参数为

$$X_{T2}^* = 0.17 \times 8.22/40 = 0.035\ \text{p. u.} \quad (6)$$

色苦—卡瓦单回110 kV线路阻抗归算到发电机组容量的参数为

$$X_{L2}^* = 0.388 \times 18 \times 8.22/115^2 = 0.004\ 3\ \text{p. u.} \quad (7)$$

220 kV卡瓦变电站1台三绕组变压器242 $\pm$ 2 $\times$ 2.5%/121/10.5 kV,额定容量为120 MVA。因此变压器漏抗折算到发电机组容量的参数为

$$X_{T3}^* = 0.14 \times 8.22/120 = 0.009\ 6\ \text{p. u.} \quad (8)$$

发电机同步电抗取值约为1.0 p.u.,因此发电机等值同步电抗为

$$\begin{aligned} X_d^* &= (1 + 1) / 2 + 0.062 + 0.029 + 0.035 + \\ &\quad 0.004\ 3 + 0.009\ 6 = 1.139\ 9\ \text{p. u.} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Q_c X_d^* &= (0.748 + 23.87) \times 1.139\ 9 \\ &= 28.062\ \text{MVA} \gg W_H = 8.22\ \text{MVA} \end{aligned} \quad (10)$$

根据计算结果可知,在益地电站全停时,往子沟双机(或单机)带线路并网运行,一旦发生线路末端断路器无故障三相断开情况下,往子沟机组将发生自励磁。

## 2.3 动态仿真以及应对措施

### 2.3.1 不增加措施的过电压电磁暂态仿真

往子沟水电站接入系统电压等级较低,线路长度较短,流域开发施工期间带 35 kV 和 110 kV 线路运行时没有自励磁问题,发生自励磁的主要因素是流域开发后期东义河汇集送出的卡瓦—水洛双回 220 kV 线路充电功率较大,在干流主要电站益地电站停运的情况下,双回 220 kV 线路线路充电功率远远大于支沟电站发电机额定容量,一旦发生线路末端断路器无故障三相断开情况,往子沟水电站和连接的线路将发生严重的谐振过电压。图 2 是通过 PSCAD 电磁暂态仿真软件对往子沟电站单机运行自励磁产生的过电压电磁暂态分析。

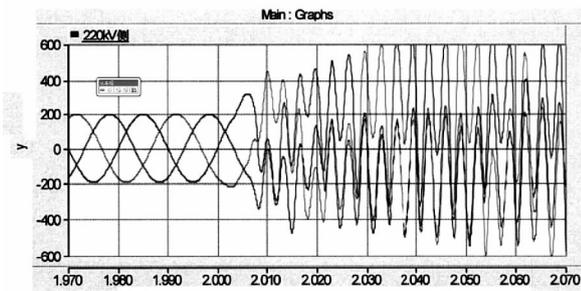


图 2 不采取任何措施下 220 kV 侧电压波形

从图 2 可以看出,在  $t = 2$  s 时发生卡瓦—水洛双回线路因安控切线或无故障跳开,220 kV 线路电压急速攀升并严重畸变,在 10 ~ 15 ms 内电压已经上升到 2 p. u. (400 kV 左右),很难以高周切机和过电压保护措施来限制自励磁过电压。

当益地电站 1 台机组开机的时候,发生同样远端与主网断开后的电压曲线如图 3。

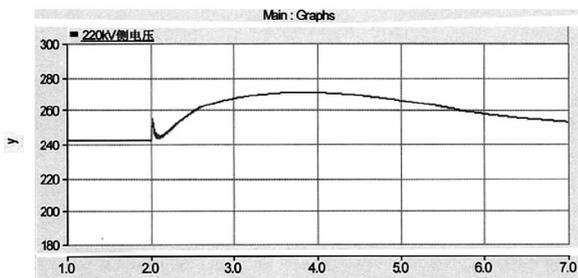


图 3 益地电站开 1 台机时电压曲线

从图 3 可以看出,当益地电站有 1 台机组开机时,同样发生卡瓦—水洛双回线路因安控切线或无故障跳开后电压最高上升到 1.15 p. u.,但电压曲线上升平缓有充足的时间供保护装置动作。

由此可知,如果不采取新增措施就不能够防止往子沟电站自励磁发生,除非保证益地电站始终有 1 台机开机,而实际生产中益地电站总有全停的时段,不能因为益地电站全停也让支沟电站全部陪停,

所以必须增加措施防止自励磁产生。

### 2.3.2 220 kV 卡瓦变电站增加低压电抗器后的过电压电磁暂态仿真

根据前面分析,往子沟电站发生自励磁的主要因素是卡瓦—水洛双回 220 kV 线路充电功率远远大于支沟电站发电机额定容量,为此可以采取在卡瓦变电站增加低压电抗器补偿线路充电功率。

卡瓦—水洛二回 220 kV 线路充电功率为 23.87 Mvar,色苦—卡瓦一回 110 kV 线路充电功率为 0.748 Mvar,两者相加为 24.618 Mvar,可以在 220 kV 卡瓦变电站增加 3 组 10 Mvar 低压电抗器。则  $Q_c = (24.618 - 30) = -5.382$  Mvar,充电功率已经补偿成为感性,往子沟电站机组不会发生自励磁。

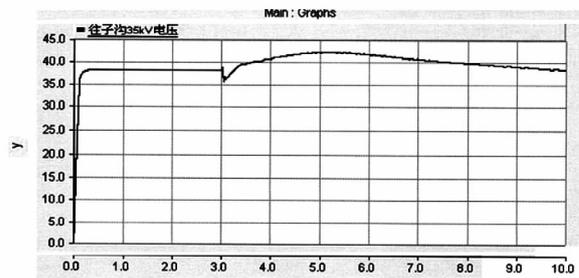


图 4 增加低压电抗器后 35 kV 电压曲线

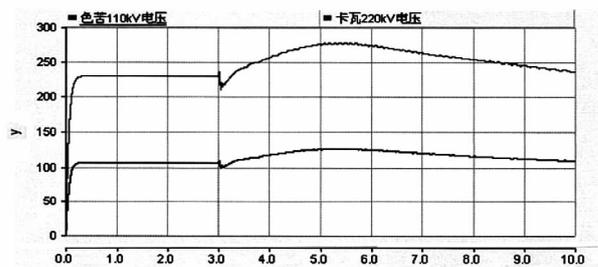


图 5 增加低压电抗器后 110 kV 以及 220 kV 电压

从图 4、图 5 可以看出在 220 kV 卡瓦变电站增加 30 Mvar 低压电抗器后,同样发生卡瓦—水洛双回线路因安控切线或无故障跳开后各个电压等级线路的电压都是缓慢上升,而且电压最高上升到 1.15 p. u.,没有超过限额。电磁暂态仿真的结果证明增加 30 Mvar 低压电抗器后,自励磁现象得以避免。

### 2.3.3 相应保护的配合

增加 30 Mvar 低压电抗器后虽然避免了自励磁过电压超限,但往子沟双机运行仿真中仍然有超过 1.3 p. u. 的情况,需要对相应保护进行修改以进一步消除风险。

首先是高周切机按以下设定:当系统频率超过 51

Hz 延时 1 s 切除往子沟机组 仿真结果电压最大值为 1.264 p. u.; 当系统频率超过 52.5 Hz 延时 0.8 s 切除往子沟机组 仿真结果电压最大值为 1.28 p. u.。

其次是过压保护设置系统电压超过 1.2 p. u. , 延时 0.3 s 以内切除往子沟机组 仿真结果电压最大值为 1.28 p. u.。

第三是卡瓦变电站主变压器低压侧开关过电压等保护动作延时要确保晚于往子沟电站切机, 否则就相当于提前切除了低压电抗器。

### 2.3.4 流域汇集站配置低压电抗器的考虑

往子沟电站解决自励磁风险最直接的方案是在本站增加低压电抗器, 但该流域支沟小电站较多, 如果每个小电站都增加会导致低压电抗器配置过多, 影响电压质量, 增加管理难度, 降低经济性。东义河流域是同一业主开发, 具备在汇集站统一进行补偿的条件, 经济性更好。应加强汇集站低压电抗器的运行管理, 避免运行中低压电抗器无意中退出运行, 对低压电抗器的退出必须考虑特殊运行方式的自励磁风险。随着流域开发推进, 中、上游电站可以参考同样的补偿方式, 在中、上游干流汇集电站增加低压电抗器以避免

.....

(上接第 69 页)

时, 导线线间距满足要求。

设计初步定横担长度为 6.3 m。导线挂点到水泥杆准线距离为 1.5 m, 水泥双杆准线间距为 3 m。

## 3 结 论

1)  $K_v$  取值校验: 各种工况下, 三类海拔地区对应悬垂绝缘子串都满足间隙圆与横担、间隙圆和斜撑之间的预留距离 105 mm 的校验条件。

2) 10 kV 直线水泥双杆不允许使用的截面导线:  $K_v$  值大于 0.9 的截面导线均不允许使用, 如需使用, 请根据当地条件自行校验。

3) 斜撑与水泥杆夹角为  $45^\circ$ , 斜撑上部连接点距离水泥杆中心的长度为 605 mm, 斜撑高为 605 mm, 满足间隙圆校验条件。

4) 横担长度为 6.3 m, 水泥杆准线距离导线挂线点 1.5 m, 整个横担成对称结构, 满足间隙圆校验条件。

中、上游支沟电站的自励磁风险。

## 3 结 语

随着水电开发不断推进偏远地区, 特殊运行方式下末端小水电并网引起的自励磁问题日渐突显, 基于施工电源电站后期并网带来的自励磁风险做出了专项分析并提出了应对措施。除此之外, 大型水电站的生态流量机组也同样存在特殊方式下自励磁的问题, 需要引起从业者的注意。

### 参考文献

- [1] 黄家裕, 周贵兴, 岑文辉, 等. 电力系统自励磁电压计算[J]. 上海交通大学学报, 1984, 18(4): 34-45.
- [2] 张华, 李旻, 丁理杰. 对地方电网小水电自励磁判断方法的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 112-117.
- [3] 丁理杰, 李旻, 张华, 等. 抑制小水电机组自励磁的非常规措施研究[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 661-664.
- [4] DL/T 5429-2009 电力系统设计技术规程[S].

(收稿日期: 2017-04-06)

5) 工频电压条件下, 直线水泥双杆仅杆身满足带电作业安全距离。严禁操作人员在斜撑、横担部分位置进行带电作业。

### 参考文献

- [1] 刘振亚. 国家电网公司配电网工程典型设计: 10 kV 架空线路分册(2013版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计: 10 kV 及 35 kV 配电线路金具图册(2013版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [3] GB 50061-2010 66 kV 及以下架空输电线路设计规范[S].
- [4] Q/GDW 13001-2014 高海拔外绝缘配置技术规范[S].
- [5] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

作者简介:

覃建南(1986), 硕士、助理工程师, 从事输电线路设计研究。  
(收稿日期: 2017-02-27)