

基于 EMTP/ATP 的 220 kV 变压器非全相运行故障分析

刘 强¹ 刘守豹¹ 许 安¹ 崔 涛¹ 邓 勇²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 国网德阳供电公司 四川 德阳 618000)

摘 要: 以四川电网某 220 kV 变电站主变压器非全相运行故障为契机,基于变压器非全相运行时各侧电压相量的理论分析,利用电磁暂态软件 EMTP/ATP 进行仿真计算分析,合理推断了主变压器非全相运行故障的原因,对理清变压器非全相运行故障机理和防止该类故障具有重要意义。计算结果表明:主变压器低压侧避雷器烧坏是由高压侧中性点接地刀闸拉开时在低压侧产生的周期性励磁涌流过电压引起的,但该操作不会导致高压侧出现过电压,高压侧避雷器动作是由于充电试验中断路器非全相合闸造成的。

关键词: EMTP/ATP; 变压器; 非全相运行

Abstract: Taking the open-phase operation fault of main transformer in a 220 kV substation of Sichuan power grid as an opportunity, based on the analysis of voltage vector in each side when the transformer is in open-phase operation, the simulation and calculation are carried out with EMTP/ATP, the reasons for open-phase operation fault of main transformer are deduced, which is of great significance for clearing the mechanism of open-phase operation fault of transformer and avoiding from this kind of fault. The calculation results show that because of the periodic excitation inrush current overvoltage in low-voltage side which is generated by the opening of neutral point disconnecter in high-voltage side, the arrester in low-voltage side of main transformer burns out, but this operation will not generate overvoltage in high-voltage side, the action of the arrester in high-voltage side are caused by the open-phase closing of circuit breaker in the charging tests.

Key words: EMTP/ATP; transformer; open-phase operation

中图分类号: TM41 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0032-06

0 引 言

电力变压器作为发电厂和变电站的核心设备之一,其安全稳定运行直接关系到电力系统的供电可靠性。根据所在电网的系统运行要求,变压器通常采用 $Y_n y0$; $Y_n d11$; $Y, d11$ 等不同的联结组形式。变压器正常运行期间,各相绕组按变比正常变换电压和电流,但是当变压器非全相运行时,由于变压器的联结组形式不同,会产生不同的变换关系^[1-4]。

2014年4月,四川某220 kV变电站发生一起因主变压器非全相运行导致的避雷器损坏事故。该变电站在进行主变压器充电试验时,前5次均未发现异常,在第6次充电时,2号主变压器的220 kV中性点接地刀闸被拉开,值班人员进行现场巡视时发现2号主变压器10 kV侧C相避雷器冒烟,随即拉开了总路开关。在之后的检查中发现2号主变压器高压侧B相避雷器动作两次,进一步检查发现其

靠近变压器侧的隔离开关由于机械故障并未合上,由此认定此次故障为变压器非全相运行导致。

针对此次变压器非全相运行故障,利用对称分量法对变压器非全相运行时各侧电压幅值及相位进行了全面分析,并使用电磁暂态仿真软件 EMTP/ATP 对分析结果进行了仿真实验。同时对变压器非全相分合闸和高压侧中性点接地刀闸操作引起的高压侧和低压侧过电压进行了仿真分析,合理推断了避雷器动作及损坏的原因。

1 变压器非全相稳态运行分析

在 EMTP/ATP 中建立变压器非全相运行(B相缺失)分析模型,为了便于与理论计算公式进行对比验证,该模型中变压器为理想化模型,且未考虑中性点接地刀闸拉开过程中的振荡过程,仅分析中性点接地刀闸拉开前后各侧的稳态电压波形,其中主变压器参数如表1所示。

表1 220 kV 三相三绕组变压器参数

变量	变压器参数	变量	变压器参数
型号	SFSZ11 - 240000 / 220	P_{K1-2} / kW	585.20
额定容量 S / MVA	240 / 240 / 120	P_{K1-3} / kW	350.36
额定电压及分接范围	$(230 \pm 8 \times 1.25\%) / 121 / 10.5 \text{ kV}$	P_{K2-3} / kW	334.44
$U_{K1-2} / \%$	14.12	空载电流 $I_0 / \%$	0.083
$U_{K1-3} / \%$	37.25	空载损耗 p_0 / kW	102.11
$U_{K2-3} / \%$	20.98	联结组别	YN _{yn0} / d11

该 220 kV 变压器是典型的 YN_{yn0} / d11 型三绕组变压器 接线方式及各侧电压相量如图 1 所示。高压侧三相电压表达为

$$\begin{aligned} U_A &= U_N \cos(\omega t) \\ U_B &= U_N \cos(\omega t - 120^\circ) \\ U_C &= U_N \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 U_N 为高压侧额定相电压峰值。

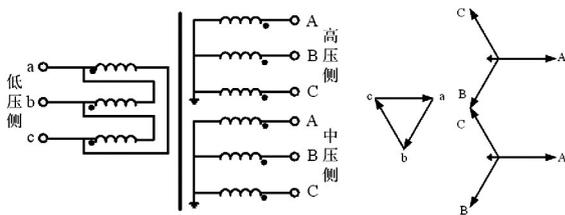


图1 变压器绕组接线图及相量图

1.1 高压侧电压波形分析

在高压侧 B 相断开 高压侧中性点接地时 ,B 相绕组磁通由低压侧向高压侧感应产生 ,产生的感应电势使得 B 相电压与正常情况下相同。在高压侧中性点断开的情况下 ,A、C 相产生的磁通在 B 相叠加后为 0 ,而且 B 相没有电流流过 ,因此 B 相电位即等于高压侧中性点对地电位 ,此时中性点电位已经漂移 ,高压侧向量图如图 2 所示。高压侧 B 相电位表达式为

$$\begin{aligned} U_B &= U_N \frac{\cos(\omega t) + \cos(\omega t + 120^\circ)}{2} \\ &= U_N \frac{\cos(\omega t + 60^\circ)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

在高压侧 B 相电压缺失的情况下 ,高压侧中性点接地刀闸拉开后的三相电压波形、中性点电压波形如图 3 和图 4 所示。

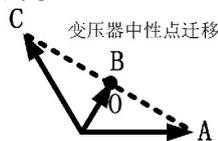


图2 高压侧 B 相缺失中性点不接地情况下的电压相量图

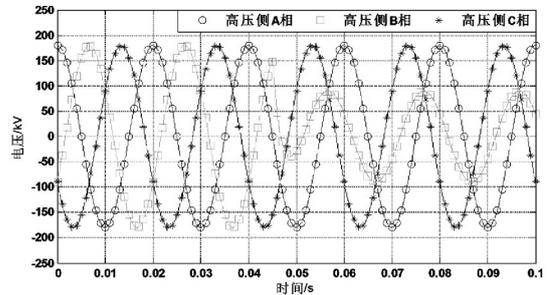


图3 中性点接地刀闸拉开后高压侧三相电压波形

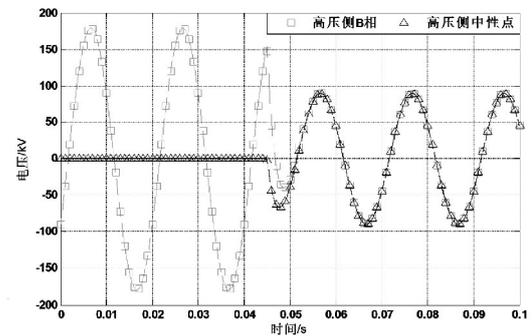


图4 中性点接地刀闸拉开后高压侧 B 相及中性点电压波形

1.2 中压侧电压波形分析

对于中压侧而言 在高压侧中性点接地刀闸拉开前 ,高压侧各相电压传递到中压侧后不发生相位变化 ,中压侧电压波形与正常情况下相同。在高压侧中性点接地刀闸拉开后 ,中压侧三相电压表达式为

$$\begin{aligned} U'_A &= \frac{U_{A0}}{n'} = \frac{\left(U_N \frac{\sqrt{3} \cos(\omega t - 30^\circ)}{2} \right)}{n'} \\ U'_B &= \frac{U_{B0}}{n'} = 0 \\ U'_C &= \frac{U_{C0}}{n'} = \frac{\left(U_N \frac{\sqrt{3} \cos(\omega t + 150^\circ)}{2} \right)}{n'} \end{aligned} \quad (3)$$

中压侧三相电压在高压侧中性点接地刀闸拉开后的波形图如图 5 所示。

1.3 低压侧电压波形分析

对于低压侧 ,当高压侧中性点接地刀闸未拉开前 ,低压侧相电压表达式为

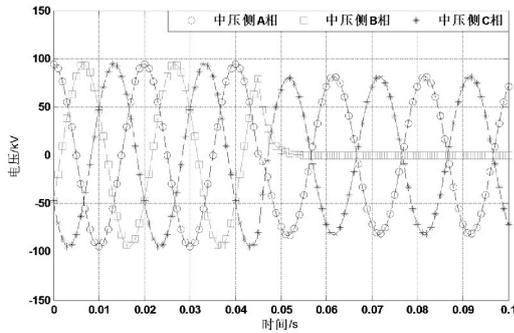


图 5 中性点接地刀闸拉开后的中压侧三相电压波形

$$\begin{aligned} U''_A &= \frac{U_N}{n''} \cos(\omega t + 30^\circ) \\ U''_B &= \frac{U_N}{n''} \cos(\omega t - 90^\circ) \\ U''_C &= \frac{U_N}{n''} \cos(\omega t + 150^\circ) \end{aligned} \quad (4)$$

当高压侧中性点接地刀闸拉开后,由于变压器为 YN_{yn0}Δ11 接线,经变压器变换后要发生相位移动。利用对称分量法进行分析,以 A 相为例,高压侧传递到低压侧后 A 相各序分量计算式为

$$\begin{aligned} U_{A1} &= (\dot{U}_{A0} + a\dot{U}_{B0} + a^2\dot{U}_{C0})/3 = \frac{1}{6}(1 - a^2) \dot{U}_{AC} \\ U_{A2} &= (\dot{U}_{A0} + a^2\dot{U}_{B0} + a\dot{U}_{C0})/3 = \frac{1}{6}(1 - a) \dot{U}_{AC} \\ U_{A0} &= (\dot{U}_{A0} + \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{C0})/3 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

高、低压侧 A 相电压的正、负序分量存在如下关系:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a\Delta 1} &= \frac{\dot{U}_{A1}}{n''} e^{j30^\circ} = \frac{\dot{U}_{AC}}{6n''} (e^{j30^\circ} - e^{j270^\circ}) \\ \dot{U}_{a\Delta 2} &= \frac{\dot{U}_{A2}}{n''} e^{-j30^\circ} = \frac{\dot{U}_{AC}}{6n''} (e^{-j30^\circ} - e^{j90^\circ}) \\ \dot{U}_{a\Delta 0} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

由低压侧相电压的序分量可得低压侧各相电压为

$$\begin{aligned} U''_A &= \frac{U_N}{2n''} \cos(\omega t - 30^\circ) \\ U''_B &= \frac{U_N}{2n''} \cos(\omega t - 30^\circ) \\ U''_C &= \frac{U_N}{n''} \cos(\omega t + 150^\circ) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中 n'' 为高压和低压侧电压变比。图 6 所示的仿真结果表明,高压侧 B 相缺相运行情况下,中性点接地刀闸拉开前,低压侧三相电压与正常运行情

况相同,中性点接地刀闸拉开后,低侧压侧 A 相和 B 相电压幅值和相位相同,且为 C 相幅值的一半。

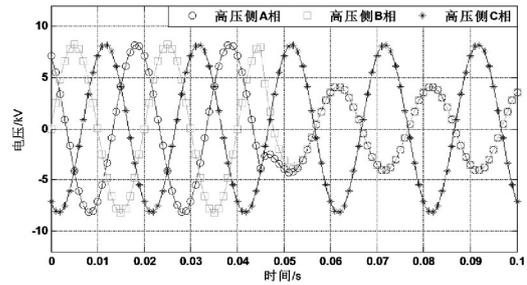


图 6 中性点接地刀闸拉开后的低压侧三相电压波形

2 高压侧中性点接地刀闸拉闸过电压分析

采用 EMTP/ATP 提供的 BCTRAN 变压器元件和非线性电感元件来模拟三相饱和变压器,通过在低压绕组增加非线性电感支路来模拟铁心的磁滞饱和效应,建立变压器非全相运行模型^[5-10],如图 7 所示。高压侧中性点接地刀闸在 0.01 s 拉开,燃弧时间为 0.011 ~ 0.03 s。

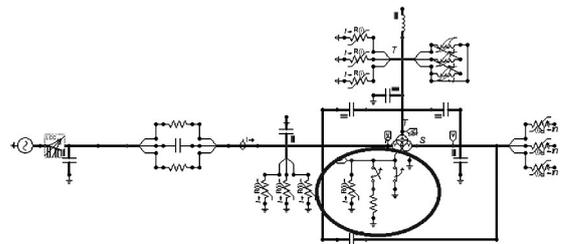
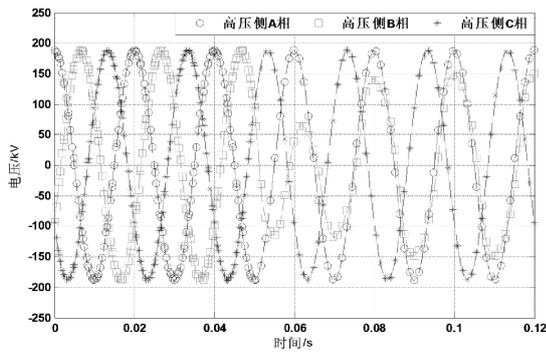


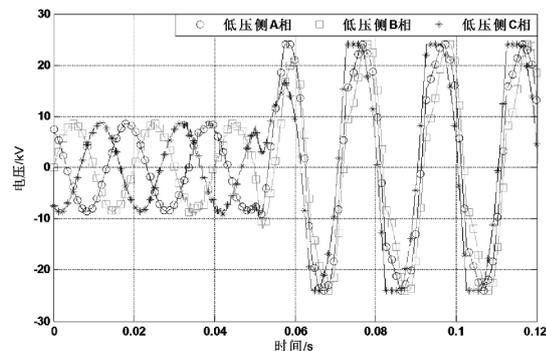
图 7 高压侧中性点接地刀闸拉闸过电压仿真模型

由图 8 和图 9 可知 2 号主变压器高压侧中性点接地刀闸拉开过程中,高压侧未产生过电压,高压侧中性点产生电压偏移,低压侧过电压产生于中性点电弧熄灭之后。由上一节变压器非全相运行各侧电压相量的理论分析可知,中性点接地刀闸拉开以后,变压器中性点电压将出现偏移,变压器三相不平衡运行,低压侧 C 相电压将是另外两相电压的两倍(见图 6)。在考虑变压器励磁饱和特性、各侧绕组之间电容和各侧绕组对地电容的情况下,高压侧中性点接地刀闸拉开将导致高压侧和低压侧 C 相励磁电流出现明显增大,在低压侧将产生频率为工频的励磁涌流过电压^[11-17],低压侧产生的励磁涌流波形如图 9(b) 所示。

由图 9(c) 可知,低压侧产生的励磁涌流过电压导致低压侧三相避雷器均动作;由于 C 相励磁涌流



(a) 高压侧三相电压波形



(b) 低压侧三相电压波形

图8 中性点接地刀闸拉开后高低压侧电压波形

明显大于其他两相,因此C相避雷器单位时间吸收的能量比A、B相避雷器高,通过计算可知,该能量高达3.1 kJ/s,而A相和B相避雷器分别为0.83 kJ/s和0.49 kJ/s。低压侧使用的避雷器型号为HY5WZ-17/45Q,该避雷器每次可释放的过电压能量按其通流能力2000 μ s(t)、方波电流200 A(I)、操作冲击电流残压38.3 kV(u)计算^[18-21]:

$$W = Iut = 200 \text{ A} \times 38.3 \text{ kV} \times 2000 \text{ } \mu\text{s} = 15.32 \text{ kJ} \quad (8)$$

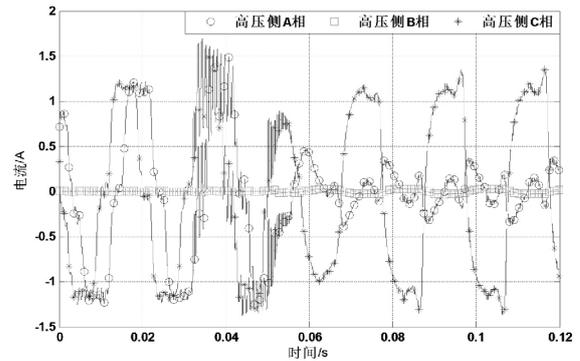
当C相避雷器在此励磁涌流过电压下运行超过5 s以后,其吸收的能量已经超过15.32 kJ的通流容量极限,使C相避雷器发生热崩溃而击穿,进而产生冒烟现象。

3 高压侧断路器非全相分合闸过电压分析

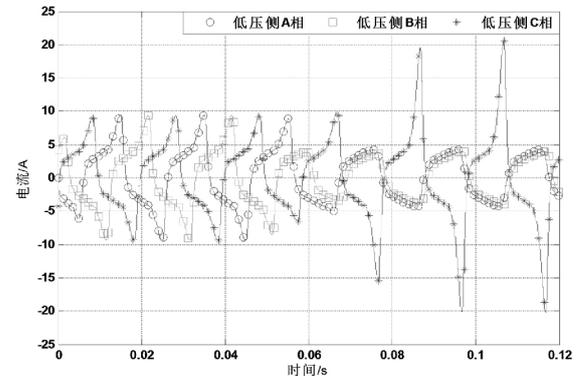
从上节分析中可知高压侧中性点接地刀闸分闸过程中高压侧未产生过电压,本节将对空载变压器分合闸过电压进行分析,寻找高压侧B相避雷器动作的原因。

3.1 非全相合闸过电压分析

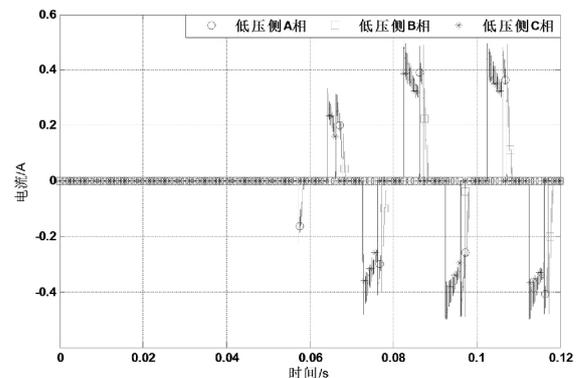
由于2号主变压器总共经历6次非全相合闸充



(a) 高压侧三相电流波形



(b) 低压侧三相电流波形



(c) 低压侧A相避雷器电流波形

图9 中性点接地刀闸拉开后高低压侧电流波形
电,对中性点接地情况下变压器非全相合闸过程中的过电压情况进行分析,当断路器在0.01~0.03 s内,即在一个周波内,每隔2 ms进行一次三相合闸操作时,考虑到合闸时刻的随机性,进行了10次合闸过电压计算,合闸时刻线性分布在0.01~0.028 s,对应的2号主变压器高压侧三相避雷器动作情况如表2所示。

通过改变变压器非全相合闸相位,发现在一个周波内合闸10次,变压器高压侧B相避雷器动作4次,动作概率为40%。结合本次故障中变压器非全相合闸6次,高压侧避雷器动作2次,仿真结果与实

表 2 非全相合闸高压侧避雷器动作情况

合闸时刻/s	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018
高压侧避雷器动作情况	无	无	无	B 相	B 相
合闸时刻/s	0.02	0.022	0.024	0.026	0.028
高压侧避雷器动作情况	无	无	无	B 相	B 相

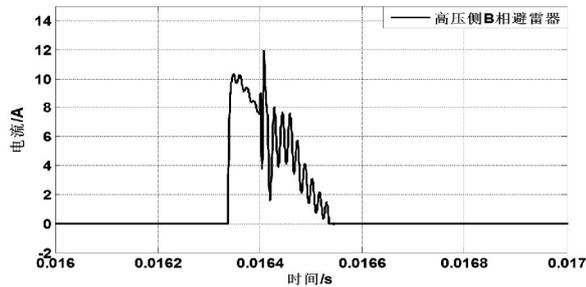
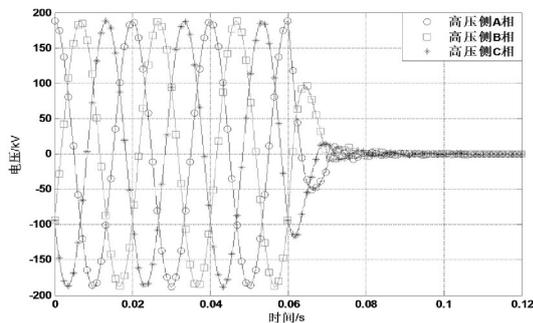
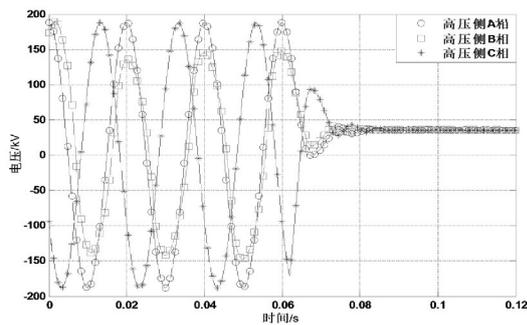


图 10 非全相合闸高压侧 B 相避雷器动作
电流波形(0.016 s 合闸)



(a) 中性点接地时高压侧三相电压波形



(b) 中性点不接地时高压侧三相电压波形

图 11 非全相分闸高压侧电压波形

际避雷器动作情况基本相符。

3.2 非全相分闸过电压分析

2 号主变压器总共经历 6 次非全相分闸,前 5 次分闸时高压侧中性点接地,第 6 次分闸时高压侧中性点不接地。为了对空载变压器非全相分闸过电压进行分析,使用了主变压器高压侧中性点接地和不接地两种分析模型,每种模型在一个周波内均匀选取 10 个分闸操作时刻进行过电压分析。计算结果表明,变压器非全相分闸不会在高压侧产生过电

压,不会导致高压侧 B 相避雷器动作,高压侧和高压侧中性点电压波形如图 11 所示。

4 结论与建议

1) 该 220 kV 变电站 2 号主变压器低压侧 C 相避雷器烧坏是由于高压侧中性点接地刀闸拉开时在低压侧产生的周期性励磁涌流过电压引起的,但该操作不会导致高压侧 B 相出现过电压。

2) 从变压器非全相分闸仿真情况推断 2 号主变压器高压侧 B 相避雷器动作 2 次是由于在 6 次充电试验中断路器非全相合闸造成的。

3) 为防止类似故障的发生,建议对主变压器进行空载合闸充电试验时,对合闸侧的断路器和隔离开关进行试验,确保断路器和隔离开关能够正常合闸到位。在拉开主变压器中性点接地刀闸前,应进行现场巡视,在保证变压器全相运行的情况下拉开中性点接地刀闸。

参考文献

- [1] 潘连荣. 输电变压器非全相运行分析[J]. 广西电力, 2013, 36(2): 65-69.
- [2] 屈刚, 李长凯, 孙林, 等. 配电变压器非全相运行时各侧相量分析[J]. 华中电力, 2006, 19(3): 16-18.
- [3] 孟恒信, 张德宏, 莫丽珍. 电力负荷变压器非全相运行分析[J]. 山西电力, 2007(4): 14-17.
- [4] 关建明. 发电机变压器组的非全相运行与保护[J]. 湖北电力, 2003, 27(5): 7-11.
- [5] 李富春, 李建兵. 基于 EMT/ATP 的变压器建模及励磁涌流的仿真研究[J]. 电气开关, 2003(4): 48-50.
- [6] 孙会浩, 刘玉林, 吴磊, 等. 基于 EMT/ATP 的变压器建模及仿真[J]. 电气应用, 2008, 27(8): 46-49.
- [7] 王晓彤, 施围. BP 算法在磁化曲线拟合中的应用[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(8): 1-4.
- [8] 王晓彤, 范越, 施围. 变压器励磁特性的修正 BP 模型[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(2): 111-115.
- [9] 王天施, 王清昊, 苑舜, 等. 220 kV 主变 10 kV 侧空载时避雷器的选择[J]. 电瓷避雷器, 2012(2): 86-90.
- [10] 戚革庆, 李维成, 文习山. 一起 220 kV 主变 10 kV 侧避雷器的损坏原因[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1085-1086.
- [11] 熊泰昌. 电力避雷器[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [12] 鲁铁成. 电力系统过电压[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [13] 李山. 基于 EMTPE 的 750 kV 空载变压器励磁涌流仿真研究[J]. 高压电器, 2013(1): 101-102.

[14] 陈珍珍, 林集明. EMT/EMTPE 使用说明 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.

[15] 林集明, 王晓刚, 班连庚, 等. 特高压空载变压器的合闸谐振过电压 [J]. 电网技术, 2007, 31(2): 6-8.

[16] 李振强, 谷定雯, 戴敏, 等. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法 [J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-390.

[17] 王燕, 皇甫成, 赵淑珍, 等. 考虑铁磁滞的变压器励磁涌流仿真分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 80-82.

[18] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.

[19] 董宏林, 张立国, 杜迎辉, 等. 变压器几起冲击合闸故障分析 [J]. 变压器, 2007, 44(10): 47-49.

[20] 张科, 马歆, 刘祖军, 等. SF₆ 断路器投切 500 kV 空载变压器试验分析 [J]. 高压电器, 2002, 38(2): 37-39.

[21] 蔡百凌, 陈葛松. 空载变压器谐振过电压的探讨析 [J]. 华中电力, 2006, 19(2): 8-10.

作者简介:

刘 强(1987), 工程师、硕士, 研究方向为电力系统过电压及其防护;

刘守豹(1983), 高级工程师、博士, 研究方向为电力系统过电压及其防护。

(收稿日期: 2015-10-22)

(上接第 28 页)

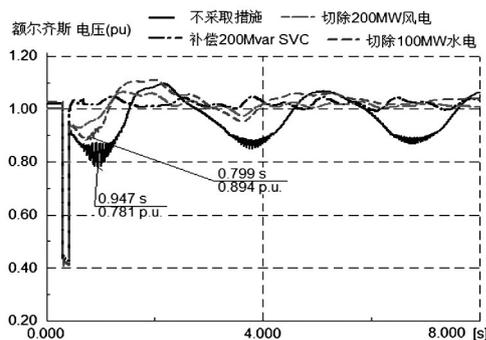


图 10 各种策略下变电站母线电压变化情况

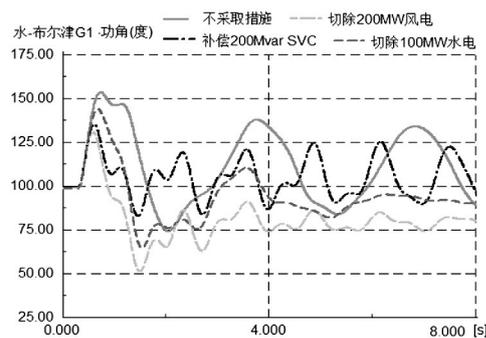


图 11 各种策略下风电机组功角变化情况

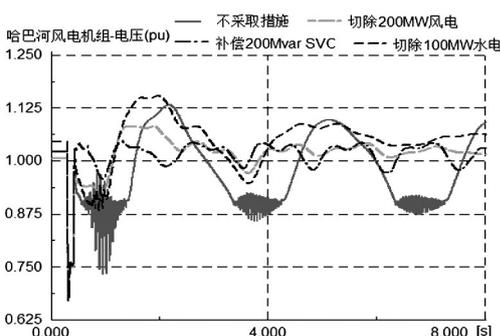


图 12 各种策略下风电机组端电压变化情况

在电压较低时有功功率无法送出, 机端频率有一个

下降的过程, 在此期间, 由于风电机组一般的频率保护为低于 48 Hz 动作, 很可能导致风电机组退出运行。因此, 虽然切除水电可以恢复系统稳定, 但风电场若无动态无功支撑能力, 还是有可能退出运行。

综合考虑, 对于网内风电装机容量超过常规电源, 且送出电力以风电为主时, 发生送出线路 N-1 故障时, 为保证地区电网的稳定运行, 建议直接采取切除部分风电出力来维持系统稳定。

参考文献

[1] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 223-229.

[2] 常喜强, 解大, 姚秀萍, 等. 新疆阿勒泰地区电网的频率动态过程仿真 [J]. 四川电力技术, 2008, 31(5): 35-38.

[3] 徐衍会, 贺仁睦, 孔祥云, 等. 调速系统超速保护控制对电力系统稳定的影响 [J]. 现代电力, 2006, 23(6): 6-9.

[4] 程旻, 吴琛, 李玲芳. 云南电网主网高周切机方案研究 [J]. 云南电力技术, 2008, 36(1): 1-4.

[5] 周川梅, 孙斌. 贵州主网及地区电网孤网运行安全稳定措施研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 54-56.

[6] 韦钢, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40.

[7] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

作者简介:

胡仁祥(1987), 硕士, 从事电网调度运行。

(收稿日期: 2015-09-06)