双电压等级电网 GIC 的相互作用特征

刘连光^{①*}, 王开让^①, 郭世晓^②, 郑宽^③, 魏凯^①, 刘春明^①, 王泽忠^①, 董博^①

① 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

② 国家电网浙江省电力公司杭州供电公司, 杭州 310009;

③ 国家电网能源研究院, 北京 102209

* E-mail: liulianguang@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2015-06-28; 接受日期: 2015-09-21; 网络出版日期: 2015-11-05

国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA121005)、国家自然科学基金(批准号: 51577060, 51177045)和科技部国际合作计划(批准号: 2010DFA04680)资助项目

摘要 电网地磁感应电流(GIC)影响因素多、机制复杂. 计算普通变压器为主的 500 kV 电网的 GIC, 通常忽略 220 kV 及以下电网的 GIC. 中国 2005 和 2009 年开始建设的 750, 1000 kV 电网普遍采用单相自耦变, 变压器原副边有直接电气联系, 研究原副边电网 GIC 的相互作用特征和影响因素, 对研究变压器干扰效应、评估地磁暴灾害风险和治理电网 GIC 具有重要意义. 本文以中国甘肃 750 与 330 kV 电网和建成及在建 1000 与 500 kV 电网为例, 运用国际上 2012 年新推出的“GIC-Benchmark”标准算例, 分别考虑忽略和不忽略变压器副边电网 GIC 的影响, 建立了甘肃主网和特高压及 500 kV 电网的 GIC 模型, 计算了相当于 2004 年 11 月 9~10 日地磁暴作用下的甘肃主网和特高压及 500 kV 电网的 GIC 水平. 比较分析了各种情况下电网 GIC 的相互作用及影响, 探明了两种电压等级电网 GIC 的相互作用特征, 以及副边电网 GIC 对 750 和 1000 kV 变压器 GIC 的贡献. 希望为电网 GIC 准确计算、地磁暴灾害风险评估及电网 GIC 治理提供科技支撑.

关键词

地磁暴
地磁感应电流
双电压等级电网
全节点模型
相互作用

1 引言

太阳在剧烈爆发活动期向广袤的空间突然释放出大量的高速粒子流, 形成太阳风暴. 当太阳风暴冲击地球磁层时, 引起地磁场的剧烈扰动称为地磁暴(或磁暴). 地磁暴不仅影响卫星和通信, 还影响地面电网和地下油气管道, 并造成危害. 地磁暴的地磁扰动(geomagnetic disturbance, GMD)在地面感应电场, 感应电场形成的地面感应电势(earth surface potential, ESP)在输电线路、两端接地的变压器与大地构成的回

路中产生地磁感应电流(geomagnetically induced current, GIC), 电网 GIC 产生及流通原理如图 1 所示. GIC 为 0.0001~0.01 Hz 的低频准直流^[1], 研究 GIC 对电网变压器的干扰可将其看成直流电流. 变压器因 GIC 衍生谐波、温升、无功消耗增大和振动、噪声等次生干扰^[2~4], 次生干扰影响继电保护的正常运行, 威胁电力变压器甚至电网的安全, 导致过大量的输电线路和变压器跳闸及大停电事故^[5~8].

电网 GIC 的大小与地磁暴类型、强度、地理位置、大地深层构造等环境因素^[9,10], 以及电网结构、

引用格式: 刘连光, 王开让, 郭世晓, 等. 双电压等级电网 GIC 的相互作用特征. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1311-1320

Liu L G, Wang K R, Guo S X, et al. Characteristics of GIC interaction in a dual-voltage-level power network (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1311-1320, doi: 10.1360/N092015-00107

变压器类型、导体电阻、线路走向等电网的构成因素有关。地磁暴的类型、强度决定太阳的活动, 大地深层构造缺乏精细的探测, 环境因素难以掌握与控制。电网因素虽可知、可控, 但规模大和数据多, 多电压等级电网 GIC 计算复杂、工作量大, 以及 500 kV 变压器多采用普通双绕组或三绕组变压器, 变压器原、副边 GIC 无法经变压器流通; 对少数采用单相自耦变的 500 kV 变电站, 因次级 220 kV 电网导线电阻普遍比 500 kV 电网导线电阻小。因此, 以往的地磁暴干扰评估, 通常忽略 220 kV 及以下电网 GIC, 只计算 500 kV 电网 GIC。电网实测数据表明^[11], 220 kV 电网 GIC 比 500 kV 电网 GIC 小 1 个数量级。

与中低纬地区的 GMD 相比, 受极区地球基本磁场强的影响, 同次地磁暴高纬地区的 GMD 相对剧烈。1989 年魁北克电网大停电事故后, 北美、北欧国家联合实施了太阳风暴计划——电网 GIC 监测项目, 开发的监测装置及系统 1994 年起在北美北欧电网大量应用^[12], 后来 GIC 在线监测发展成为美国 500 和 760 kV 电网的常规监测项目, 也因此, 电网 GIC 理论计算的研究进展相对缓慢。2012 年, 由美国电力科学研究院牵头, 加拿大自然资源部、美国伊利诺伊大学香槟分校、芬兰气象研究院等单位科学家合作, 联合推出了计算多电压等级电网 GIC 标准算例——“GIC-Benchmark”^[13]。“GIC-Benchmark”算例的成功开发, 为复杂电网 GIC 计算和 GIC 问题的深入研究提供了支撑。基于该算例, 2013 年, 郑宽等人^[14]研究了“GIC-Benchmark”算例的应用条件和变压器等设备的处理方法, 提出了考虑自耦变压器的绕组联结方式和变压器组合方式等影响因素, 建立多电压等级电网 GIC 全节点模型和基于节点导纳矩阵的算法, 计算了中国“三华”特高压规划电网的 GIC 水平^[15]。

GMD 感应电场在电网产生 GIC 机理和流通过程如图 1 所示, GIC 流经变压器衍生的谐波、温升干扰是损伤变压器和威胁电网安全的根本原因。因此, 除电网 GIC 之外, 张冰^[16]结合中国 750 kV 及以上电压等级电网的变压器, 对大型壳式和芯式变压器的谐波、温升效应开展了研究, 建立了考虑负载电流、功率因素、接线方式等影响的变压器场路模型以及 GIC 漏磁通、谐波、温升等效算法, 探明了 GIC 漏磁通是导致的支撑件和油箱温升及变压器损毁的主因, 发现了箱体和支撑件温升迅速增大的部位和温升明显增大的 GIC 量值, 揭示了 GIC 对大型变压器谐波、

图 1 电网的 GIC 产生及流通原理图

温升效应的贡献^[16]。

以上研究, 揭示了中低纬(中国)电网 GMD 成灾机理与响应机制, 说清楚了 GMD 对未来电网安全的影响与严重危害, 2014 年 12 月, 中国工程院就电网地磁暴灾害的防御和油气管道地磁暴侵害的测评, 向国务院呈报了《关于加强油气管网和电网地磁暴灾害防御的建议》报告。中国 2005 和 2009 年开始, 分别在西北和中部地区建设 750 和 1000 kV 电网, 750 和 1000 kV 电网普遍采用单相自耦变压器, 例如, 图 1 左边变压器可看成是发电厂或送端电网的变压器; 右边是受端电网自耦变压器, 由于要传输大功率的电力, 变压器母线上的 330 或 500 kV 馈线条数比较多, 330 或 500 kV 电网 GIC 可经自耦变压器的公共绕组及中性点流入、流出变压器, 对 750 或 1000 kV 变压器的 GIC 形成影响。根据前期的大量成果, 本文研究了双电压等级电网 GIC 的相互影响, 以期探明 GIC 的相互作用特征, 为在电网规划设计阶段, 通过采取评估电网 GIC, 布置和布局输电线路接入变电站的方向及方式抑制 GIC 提供参考。

2 电网 GIC 模型与算法

地磁暴干扰事件与太阳表面和行星际太阳风暴的条件和大地的条件有关^[17,18], 由于日地距离近 1.5×10^8 km, 电网的条件是 GIC 事故风险的内因与关键条件^[19], GIC 模型算法是防灾研究的基础。

2.1 电网 GIC 全节点模型

普通双、三绕组变压器为主的电网, GIC 模型变电站母线和变压器中性点为节点, 考虑电网和变压器电阻等因素的影响, 建立电网 GIC 模型和选用节点导纳矩阵法或回路阻抗矩阵法算法^[20,21], 计算输

电线路和变压器中性点 GIC, 模型和算法相对简单. 750 和 1000 kV 电网普遍采用单相组式自耦变, 其中, 1000 kV 变压器还单独设置调压补偿变. 评估 750 和 1000 kV 电网 GIC, 750 和 1000 kV 变压器 GIC 效应研究, 以及 750 和 1000 kV 电网 GIC 治理, 以往的建模方法已不能满足需要. “GIC-Benchmark”考虑了变压器绕组联结方式、不同类型变压器组合方式、单(双)回输电线路、串补以及接地电容等设备等的影响, 为建立多电压等级电网的 GIC 模型提供了参照的标准, 文献[14]中把考虑“GIC-Benchmark”算例影响因素选取节点与划分支路建立的多电压等级电网的 GIC 模型称作为“全节点模型”.

在高纬度地区 GIC 的研究中, 认为地磁感应是东西方向流动的极光电集流驱动的, 产生的地面电场为东西方向, 由此得出结论: 东西走向的输电线路中容易出现较大 GIC^[22], 加拿大 GIC 监测数据的统计研究支持这一结论^[23]. 文献[24]根据广东肇庆地磁台 2004 年 11 月磁暴数据, 计算的地面电场南北分量明显大于东西分量, 并对中低纬地面电场也为东西方向表示怀疑, 但因空间物理研究中, 对驱动中低纬地磁感应的电离层电流模式尚无定论. 在没有足够的证据证明中低纬地区南北走向的线路更易发生较大 GIC 的情况下, 本文利用 2004 年 11 月地磁暴数据计算实际地区地电场, 结合中国西电东送电网电力流实际流向, 并认为南北、东西走向的线路中产生较大 GIC 的概率相同, 研究中国高风险双电压等级电网 GIC 相互作用. 选择东西向明显的甘肃省主网为研究对象电网, 选建成及在建 1000 与 500 kV 电网为验证电网, 分别建立电网 GIC 全节点模型和忽略变压器次级电网 GIC 模型, 计算大规模电网的 GIC.

与国外相比, 中国未对电网 GIC 采取过相应的治理措施, 西北 750 kV 电网没有安装串补装置, 目前中国电网 GIC 建模与计算需要进行一些特殊处理的工作还相对较少, 建立研究对象电网、验证电网的 GIC 全节点模型还相对简单. 对建立图 2 和建成及在建特高压电网 GIC 全节点模型, 主要需要忽略自耦变压器三角形联结(D)绕组的母线节点, 建立自耦变压器低压母线节点以及星形联结(Y)绕组中性点引出并接地的节点, 并分别将这些对 GIC 有影响的母线节点、变压器中性点节点设为独立节点, 并根据这些节点的电压等级, 决定是否定义相同电压等级节点支路的类型, 并依据文献[14]处理自耦变压器绕组联

结方式和变压器组合方式, 确定 GIC 通路即可.

2.2 感应地电场算法

全节点模型是电网模型. 根据图 1 电网 GIC 原理和基于麦克斯韦方程, 分析 GIC 地球物理因素^[22,23]: 地磁暴感应电场决定地磁扰动变化率, 作用在两变压器中性点间的 ESP 关系两中性点间的大地深层的电性构造. 由于地磁暴地磁扰动的频率为 0.0001~0.01 Hz(GIC 频率), 理论上, GIC 透入深层大地深度可达 10^3 km, 实际计算通常考虑深至 400~500 km 的大地电阻率^[24,25]. 由于深层大地电性构造和岩石圈的地质结构复杂, 以及大地电导率横向突变处会导致地磁暴感应地电场的突变^[10], 探明大地深层的电性构造, 要求大地电磁测深精细, 大面积的精细电磁测深的费用投入巨大, 准确计算中国大面积的地磁暴感应地电场非常困难.

根据吉林大学刘国兴教授建立的西北电网线路沿线分层大地电阻率模型, 2004 年 11 月 9~10 日地磁暴(Kp=8)西北 4 个地磁台数据计算地电场, 地电场方向为东南向^[26]; 其中, 陕甘青宁地区峰值 $E=0.7588$ V/km, 东向分量 $E_E=0.36$ V/km, 北向分量 $E_N=-0.668$ V/km. 文献[27]计算的中国新疆地区地电场峰值 $E=0.9397$ V/km; 其中, 东向分量 $E_E=0.3026$ V/km, 北向分量 $E_N=-0.8896$ V/km. 由于 2004 年 11 月 9~10 日地磁暴不是第 22 和 23 太阳周的最大地磁暴, 受大地测深数据测点稀疏的影响, 本文取新疆的地电场值计算甘肃电网的 GIC. 另外, 文献[1,25]利用“中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究”等资料, 对中国广东、江苏地电场值的估算都有接近 1 V/km 的情况, 以及虽然文献[10]的研究结果表明, 在大地电阻率横向突变处, 大地电场的水平分量会出现高达十几伏的情况, 但大量的输电线路两端变压器的接地点落在大地电阻率横向突变处的概率不大. 因此, 本文提出取 1 V/km 地电场评估中国特高压大电网 GIC 的安全风险.

3 电网 GIC 计算

3.1 甘肃电网 GIC 计算

为分析 330 kV 电网 GIC 对 750 kV 变压器的影响, 分别考虑 330 kV 电网、750 kV 电网和 330 与 750 kV 双电压等级电网三种情况, 建立电网 GIC 的全节

点模型和简化模型, 运用 MATLAB 计算三种电网的 GIC. 电网地理接线如图 2 所示, 黑色表示 750 kV 线路, 绿色表示 330 kV 线路, 为分析 750 kV 变电站变压器 GIC 的影响因素, 红色站名表示 GIC 水平较高或 GIC 变化值较大的变电站.

为便于与实测值比较, 结果用三相 GIC 值表示, 线路和变电站 GIC 结果考虑支路并联联结, 按线路实际回路和各变电站主变类型相同, 实际每条线路和每台主变 GIC 值分别为所给计算结果 $1/n_L$ 和 $1/n_T$. 其中, n_L 为线路回数, n_T 为变电站主变台数. 此外, 为方便比较分析, 所给 GIC 计算结果为绝对值, 不考虑 GIC 入地及流出的方向.

根据全节点模型和新疆地电场值, 计算 750 和 330 kV 线路及变压器中性点 GIC. 计算结果数据量大, GIC 对电网危害在变压器 GIC 衍生干扰^[13], GIC 大, 衍生干扰大, 危害越大, 以及变压器干扰不由线路 GIC 决定, 重点列出 750 kV 变电站计算结果和 GIC 值超过 20 A 的 330 kV 变电站的计算结果, 并按 GIC 值的大小, 从大到小排列顺序给出, 变压器中性点 GIC 值如图 3 和 4 所示.

比较 750 和 330 kV 变电站 GIC 可看出, 在同次地磁暴作用下, 750 kV 变电站的 GIC 普遍比 330 kV 变电站的 GIC 大. 其中, GIC 值最大的 750 kV 变电站为乾县站, 变压器中性点 GIC 值为 183.5 A; GIC 值最大的 330 kV 变电站为定西站, 流经中性点的三相 GIC 值为 61 A. 原因分析表明: 一是因为 750 kV 线路的长度普遍比 330 kV 线路长, 例如, 750 kV 线路的长度范围为 70~316 km, 330 kV 线路的长度范围为 19~194 km; 二是因为 750 kV 线路导线结构不同, 导线的直流电阻小, 例如, 750 kV 线路采用 400 mm² 六分裂导线, 而 330 kV 线路采用二分裂导线, 750 kV 导线的单位直流电阻不大于 330 kV 线路 1/3; 因此, 在同次地磁暴下, 750 kV 电网 GIC 比 330 kV 电网更大.

2004 年 11 月 9~10 日地磁暴岭澳核电站变压器中性点 GIC 最大值为 75.5 A^[1]. 与岭澳核电站的 400 mm² 四分裂导线电网相比, 采用 400 mm² 六分裂导线的甘肃 750 kV 电网的乾县变电站和沙洲变电站主变中性点的 GIC 高于 75.5 A, 分别为 91.7 和 83.1 A. GIC 高于 30 A 的 750 kV 变电站还有宝鸡站、兰州东站和酒泉站. 330 kV 定西站和红柳站的主变中性点

图 2 甘肃省主电网地理接线图(黑色为 750 kV 电网, 蓝色表示 330 kV 电网)

图3 750 kV 变电站的 GIC 计算结果

图4 GIC 值较大的 330 kV 变电站 GIC 计算结果

GIC 接近或高于 30 A. 文献[16]研究表明, 某单相芯式变压器 GIC 达 30 A 时, 油箱会出现局部过热现象, 达 45 A 时铁心夹件出现局部过热, 以及该变压器在 30 A 的 GIC 作用下励磁电流总畸变率可达 1.12. GIC 的衍生干扰会对电网变压器、继电保护和静止无功补偿装置等产生不利影响^[2~4], 750 kV 电网及变压器的 GIC 比 500 kV 电网更大.

3.2 特高压电网 GIC 计算

与 2009 年开始建设的特高压电网相比, 甘肃电网结构复杂、电网数据多. 为准确掌握双电压等级电网的 GIC 相互作用特征及规律, 取中国建成及在建的 1000 与 500 kV 双电压等级电网, 根据特高压电网西电东送、南北互联发展规划, 取东向和北向感应电场分别为 1 V/km, 采用甘肃电网同样的 GIC 建模方法和算法, 计算电网的 GIC.

特高压电网的结构简单, 为便于比较, 计算结果直接绘制在图中, 用圆圈大小和线条粗细表示 GIC 大小, 并考虑流入、流出变压器 GIC 方向. 在东向和北向电场作用下, 不考虑 500 kV 电网 GIC 的影响,

1000 kV 电网变压器及线路 GIC 计算结果如图 5 所示; 考虑 500 kV 电网 GIC 影响, 双电压等级电网变电站及线路计算结果如图 6 所示.

在 2004 年 11 月 9~10 日相当地磁暴的作用下, 特高压电网的一些 1000 kV 变电站和线路的 GIC 比 750 kV 电网的 GIC 更大. 例如, 淮南、上海、福州 1000 kV 变电站和浙北-福州等线路. 在东向电场的作用下, 淮南和上海站 1000 kV 变压器中性点的 GIC 值分别为 382.9 A 和 375.88 A, 淮南和上海站双电压等级下变压器中性点 GIC 值分别为 383.79 A 和 346.62 A; 其中, 淮南站 GIC 从大地流入中性点, 上海站 GIC 从中性点流入大地. 在北向电场的作用下, 淮南和福州站 1000 kV 变压器中性点的 GIC 值分别为 206.48 A 和 248.81 A, 双电压等级下淮南和福州站中性点 GIC 值分别为 200 A 和 249.28 A; 其中, 淮南站 GIC 从中性点流入大地, 福州站 GIC 从大地流入中性点. 1000 kV 电网的 GIC 比 750 kV 电网更大的原因是: 两中性点间线路更长, 并且采用 500 mm² 八分裂导线, 导线的直流电阻更小造成的.

上述这些 GIC 非常大的变电站的共同特点是: 这些变电站都为 1000 kV 线路的终端变电站, 由于变电站左右或上下没有变电站对称的 1000 kV 线路的 GIC 对中性点 GIC 的相互抵消作用, 故变压器中性点的 GIC 非常大. 我们对这些变电站变压器中性点 GIC 非常大的现象定义为: 电网 GIC 的终端变电站效应. 750 kV 以及 500 kV 电网同样存在 GIC 的终端变电站效应, 由于电网的 GIC 相对小, 表现不明显. 特高压电网中存在 GIC 终端变电站效应的变电站, 是电网地磁暴灾害高风险节点. 图 5 和 6 电网 GIC 值不比文献[15]电网 GIC 大, 与目前建成及在建的特高压电网的规模还不大有关.

4 电网 GIC 的相互作用

统计甘肃和特高压双电压等级电网(全节点模型)及单电压等级电网(简化模型)计算结果, 分别给出计算结果对比图, 变电站和线路 GIC 按变化值从大到小顺序排列, 330 kV 电网数据量大, 列出变化值超过 10 A 的变电站和线路进行比较.

4.1 330 kV 电网对 750 kV 电网的影响

750 kV 和双电压等级电网变电站 GIC 对比如图 7

图 5 1000 kV 电网变电站和线路的 GIC

(a) 1 V/km 东向电场作用下电网 GIC; (b) 1 V/km 北向电场作用下电网 GIC

图 6 双电压等级电网变电站和线路的 GIC

(a) 1 V/km 东向电场作用下电网 GIC; (b) 1 V/km 北向电场作用下电网 GIC

图 7 有无 330 kV 电网时 750 kV 变电站 GIC 对比

所示. 可看出, 受 330 kV 电网 GIC 的影响, 有些 750 kV 站的 GIC 增大, 有些站 GIC 减小. 其中, 敦煌站 GIC 由 106.9 A 减小至 45.9 A, 减小了 61 A; 沙洲站 GIC 由 195 A 减小至 166.4 A, 减小了 28.6 A; 酒泉站 GIC 由 84.2 A 减小至 56.7 A, 减小了 27.5 A; 武胜站 GIC 由 50.5 A 减小至 25.8 A, 减小了 24.7 A; 宝鸡站 GIC 由 69.1 A 增大至 94.3 A, 增大了 25.1 A; 这些站的 GIC 变化值均超过 20 A. 为什么有些 750 kV 站的

GIC 减小, 有些站增大, 分析变电站馈线接线发现, GIC 值变化大的变电站馈线的接线特征是: 一是要多条 330 kV 线路与变电站相接; 二是沿电场方向, 当接入该站的多数 330 kV 线路与多数 750 kV 线路位于变电站同一侧时, GIC 增大, 如宝鸡 750 kV 站; 当多数 330 kV 线路位于变电站多数 750 kV 线路相反侧时, GIC 减小, 如敦煌 750 kV 变电站.

中性点 GIC 变化的理论是: 流入或流出中性点的 GIC 符合节点电流定律, 即中性点 GIC 为连接该变压器所有线路 GIC 的代数和, 中性点 GIC 的大小取决于各线路 GIC 大小以及从中性点流入及流出大地的方向. 例如, 设图 1 右侧的 750 kV/330 kV 变压器, 该变压器 750 kV 线路和 330 kV 线路按地理位置均为由左向右方向送电, 感应地电场在 750 kV 线路和 330 kV 线路产生的 GIC 方向如图 1 所示, 三相 750 kV 线 GIC 从中性点流入大地, 三相 330 kV 线路 GIC 从中性点流入变压器, 330 kV 线路的 GIC 使中性点入地 GIC 减小; 如果 330 kV 线路反方向送电, 330 kV 线路的 GIC 方向和图 1 相反, 中性点 GIC 增大.

图 8 有无 330 kV 电网时 750 kV 线路 GIC 对比

750 kV 与双电压等级电网 750 kV 线路 GIC 对比如图 8 所示. 可看出, 受 330 kV 电网 GIC 的影响, 750 kV 线路的 GIC 值也有增减, 但增减值不大, 多数线路的 GIC 值基本不变. GIC 变化值超 20 A 的线路只有 2 条: 沙洲-敦煌线路三相 GIC 值 195 A 减小至 166.4 A, 减小了 28.6 A; 酒泉-河西线路三相 GIC 值由 386.1 A 增大至 406.9 A, 增大了 20.8 A. 330 kV 电网对 750 kV 线路影响不大的物理解释是: 在地电场作用下, 在一些长线路 330 kV 变电站与 750 kV 变电站之间, 形成对 330 kV 线路与 750 kV 线路共同作用的电势差, 在 750 kV 线路产生反方向 GIC, 使 GIC 减小, 例如, 干河口三座 330 kV 变电站与沙洲 750 kV 变电站间电势差对沙洲-敦煌线路 GIC 的作用; 以及酒泉-河西 330 kV 线路与 750 kV 线路并联, 330 kV 线路对 750 kV 线路分流使线路 GIC 增大.

4.2 750 kV 电网对 330 kV 电网的影响

330 kV 电网与双电压等级电网中 330 kV 变电站的 GIC 对比如图 9 所示, 330 kV 线路的 GIC 对比如图 10 所示. 可看出, 受 750 kV 电网 GIC 影响, 330 kV 变电站和线路的 GIC 数值或增或减, 但多数 330 kV 变电站基本不变. 三相 GIC 变化值超过 20 A 的 330 kV 变电站只有瓜州站, GIC 值由 7.7 A 增大至 27.8 A; 接近 20 A 的红柳站 GIC 值由 27.7 A 增大至 45.5 A. 三相 GIC 变化值超过 20 A 的 330 kV 线路有兰州东-卧龙川, GIC 值由 40.4 A 减小至 19.2 A; 酒泉-嘉峪关的 GIC 值由 69.1 A 增大至 89.4 A; 敦煌-布隆吉的 GIC 值由 40.4 A 减小至 20.2 A; 敦煌-瓜州的 GIC 值由 7.7 A 增大至 27.8 A.

结果表明, 750 kV 电网对 330 kV 电网 GIC 的影响,

图 9 有无 750 kV 电网时 330 kV 变电站 GIC 对比

图 10 有无 750 kV 电网时 330 kV 线路 GIC 对比

响, 没有 330 kV 电网对 750 kV 电网 GIC 的影响大. 其物理解释是: 变压器的公共绕组电阻比 330 kV 线路的电阻小, 750 kV 线路 GIC 多数选择公共绕组经中性点入地; 750 kV 电网 GIC 对 330 kV 线路的影响比对 330 kV 变电站的影响大, 原因是 330 kV 线路与 750 kV 线路接入同座 750 kV 站, 该站受 750 kV 线路 GIC 的直接影响, 而 330 kV 变电站经 330 kV 线路与 750 kV 站相连, 330 kV 站 GIC 变化由与其相连的 330 kV 线路 GIC 变化决定, 330 kV 站 GIC 受 750 kV 线路 GIC 的影响小. 另外, 从图 2 电网地理接线也可看出, GIC 发生变化的 330 kV 线路均与 750 kV 变电站直接相连, 而不与 750 kV 变电站直接相连的 330 kV 线路的 GIC 值基本不变, 例如, 陇西-秦安和山丹-东大滩等 330 kV 的输电线路.

4.3 500 kV 电网对 1000 kV 电网的影响

按甘肃电网数据统计方法, 同样可对比 500 kV 电网 GIC 对 1000 kV 变电站 GIC 的影响, 500 kV 电网 GIC 对 1000 kV 线路 GIC 的影响, 以及 1000 kV 电网 GIC 对 500 kV 变电站 GIC 的影响. 数据比较结果表

明, 两电压等级电网 GIC 的相互影响, 与 330 kV 电网与 750 kV 电网同样的相互作用特征; 以及 500 kV 电网 GIC 对 1000 kV 线路的影响不大, 个别有变化的线路差值均在 50 A 内。其物理解释是: 与特高压变电站等效直流电阻相比, 特高压线路的直流电阻大, 500 kV 线路的 GIC 选择相连阻值较小的 1000 kV 变压器中性点流入大地。线路的 GIC 对电网安全威胁不大, 重点关注变压器 GIC, 给出在向东、北向电场作用下, 500 kV 电网 GIC 对 1000 kV 变电站 GIC 影响对比如图 11 和 12 所示。

可看出, 受 500 kV 电网的影响, 一些特高压变电站的 GIC 增大, 一些减小。其中, 在向东电场作用下, 增减超过 20 A 的变电站有: 苏州站 GIC 由 36.3 A 增至 108.34 A, 增大 72.04 A; 浙北站 GIC 由 0.58 A 增至 59.64 A, 增大 59.04 A; 泰州站 GIC 由 126.37 A 减至 81.74 A, 减少 44.63 A; 上海站 GIC 由 375.89 A 减至 346.62 A, 减少 29.27 A。在北向电场作用下, 增减超过 20 A 的变电站有: 苏州站 GIC 由 139.83 A 减至 36.29 A, 减少 103.54 A; 浙北站 GIC 由 72.42 A 增至

图 11 东向电场作用下, 有无 500 kV 电网时 1000 kV 变电站 GIC 对比

图 12 北向电场作用下, 有无 500 kV 电网时 1000 kV 变电站 GIC 对比

98.37 A, 增大 29.95 A; 皖南站 GIC 由 31.82 A 增至 56.64 A, 增大 24.82 A; 南京站 GIC 由 74.09 A 增至 94.36 A, 增大 20.27 A。与甘肃电网相比, 虽然 500 kV 电网电阻比 330 kV 电网小, 但 1000 kV 站 GIC 增减与甘肃电网相当, 其物理解释是: 虽然 500 kV 电网电阻小, 但经济发达地区 500 kV 线路短、回数多, 流入特高压站的 500 kV 线路 GIC 值与 330 kV 电网长线路 GIC 值相当。使变压器中性点 GIC 增减变化的接线特征与甘肃电网特征相同, 从图 6 可看出, GIC 增减变化超过 20 A 的变电站, 都是负荷中心, 接入 500 kV 馈线多的变电站, 接入方向决定 GIC 值增减。

5 结论

本文针对中国电网的构成及发展的实际, 研究了 750 kV 与 330 kV 和 1000 kV 与 500 kV 两种双电压等级电网 GIC 的相互作用, 主要结论如下。

(1) 通过自耦变压器传输、分配电力的 330 与 750 kV 和 500 与 1000 kV 电网, 变压器原副边电网的 GIC 相互影响, 导致变压器中性点及原副边线路的 GIC 值改变; 其中, 低压电网 GIC 引起的变压器中性点 GIC 改变最大。变压器中性点 GIC 改变特征是: 有多条 330 kV 或 500 kV 线路的 750 kV 或 1000 kV 变电站, 当接入变电站的多数 330 kV 或 500 kV 线路与该站的多数 750 kV 或 1000 kV 线路位于变电站的同一侧时, 中性点的 GIC 增大; 当多数 330 kV 或 500 kV 线路位于该站的多数 750 kV 或 1000 kV 线路相反侧时, 中性点 GIC 减小。

(2) 本文揭示的自耦变压器中性点 GIC 改变特征, 为在电网规划设计及变压器选址中, 削弱、抑制电网 GIC 的影响, 防御电网地磁暴灾害提供了可能与思路。在 750 和 1000 kV 变电站选址以及送受端电网规划上, 纳入变压器中性点 GIC 最小为电网规划的约束条件, 建立基于“GIC-Benchmark”标准算例的规划电网 GIC 全节点模型, 计算电网的 GIC 及其影响, 选择 GIC 值及影响最小的电网规划设计方案。用过优化电网的构成与结构抑制 GIC 干扰, 是一种可深入研究和尝试的措施。在电网规划设计上, 不具备对大地精细探测的条件, 取感应地电场为 1 V/km 计算 GIC 符合中国国情。

(3) 本文 750 和 1000 kV 电网 GIC 计算数据和

500 kV 电网 GIC 实测数据表明: 在地磁暴侵害下, 电网构成与结构、GIC 流通回路电阻是决定电网 GIC 大小的主要因素. 中国已按电压等级制定了电网标准化设计的相关标准, 因此, 本文验证了电压等级越

高的电网, 具有 GIC 越大的特征及规律, 以及地磁暴对 750 和 1000 kV 电网的影响和危害, 比地磁暴对 500 kV 电网的影响和危害大. 地磁暴灾害防御是我未来电网建设的重要任务之一.

致谢 感谢中国地震局地磁台网中心高玉芬、杨冬梅、李琪和吉林大学刘国兴为研究提供的数据; 感谢 Risto J. Pirjola 和 David H. Boteler 为问题讨论提供的帮助.

参考文献

- 1 Liu C, Liu L, Pirjola R. Geomagnetically induced currents in the high-voltage power grid in China. *IEEE Trans Power Deliver*, 2009, 24: 2368–2374
- 2 刘连光, 张冰, 肖湘宁. GIC 和 HVDC 单极大地运行对变压器的影响. *变压器*, 2009, 46: 32–35
- 3 刘连光, 张冰, 肖湘宁, 等. 地磁感应电流作用下的变压器励磁电流谐波分析. *变压器*, 2010, 47: 43–46
- 4 张冰, 刘连光, 肖湘宁. 地磁感应电流对变压器振动、噪声的影响. *高电压技术*, 2009, 35: 900–904
- 5 Kappenman J G. Geomagnetic storms and their impact on power systems. *IEEE Power Eng Rev*, 1996, 16: 5, doi: 10.1109/MPER.1996.491910
- 6 Gaunt C T, Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk. In: *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. Lausanne, Switzerland: IEEE*, 2007. 807–812
- 7 Boteler D H, Pirjola R J, Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Adv Space Res*, 1998, 22: 17–27
- 8 Wik M, Viljanen A, Pirjola R, et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden. *Space Weather*, 2008, 6: S07005
- 9 刘连光, 吴伟丽. 电网磁暴灾害风险影响因素研究综述. *地球物理学报*, 2014, 57: 1709–1719
- 10 董博, 王泽忠, 刘连光, 等. 大地电导率横向突变处磁暴感应地电场的邻近效应. *地球物理学报*, 2015, 58: 238–246
- 11 刘连光, 刘春明, 张冰, 等. 中国广东电网的几次强磁暴影响事件. *地球物理学报*, 2008, 51: 976–981
- 12 Leshner R L, Porter J W, Byerly R T. SUNBURST-A network of GIC monitoring systems. *IEEE Trans Power Deliver*, 1994, 9: 128–137
- 13 Horton R, Boteler D H, Overbye T, et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents. *IEEE Trans Power Deliver*, 2012, 27: 2368–2373
- 14 郑宽, 刘连光, Boteler D H, 等. 多电压等级电网的 GIC-Benchmark 建模方法. *中国电机工程学报*, 2013, 33: 179–186
- 15 刘连光, 郭世晓, 魏恺, 等. 基于全节点 GIC 模型的三华电网地磁感应电流计算. *电网技术*, 2014, 38: 1946–1952
- 16 张冰. 大型电力变压器 GIC 影响效应研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2010
- 17 刘连光, 王开让, 赵春红, 等. 太阳风暴对电网干扰的日面参数与条件. *电工技术学报*, 2013, 28(增刊): 360–366
- 18 王开让, 刘连光, 李燕. 地磁感应电流行星际起因及其电网效应的初步分析. *天文学报*, 2014, 55: 381–390
- 19 刘连光. 灾害空间天气对中国电网安全的影响及风险. *中国工程科学*, 2010, 12: 29–33
- 20 Lehtinen M, Pirjola R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically-induced electric fields. *Ann Geophys*, 1985, 3: 479–484
- 21 Pirjola R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Trans Plasm Sci*, 2003, 8: 12–13
- 22 Bolduc L, Langlois P, Boteler D, Pirjola R. A study of geomagnetic disturbance in Quebec I. Genral results. *IEEE Trans Power Deliver*, 1998, 13: 1251–1256
- 23 Pirjola R, Boteler D H, Viljanen A, et al. Prediction of geomagnetically induced currents in power transmission systems. *Adv Space Res*, 2000, 26: 5–14
- 24 刘春明. 中低纬电网地磁感应电流及其评估方法研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2009
- 25 Liu C M, Liu L G, Pirjola R, et al. Calculation of GIC in mid-low-latitude power grids based on the plane wave method: A preliminary case study. *Space Weather*, 2009, 7: S04005
- 26 Liu C M, Li Y L, Pirjola R. Observations and modeling of GIC in the Chinese large-scale high-voltage power networks. *J Space Weather Space Clim*, 2014, 4: A03

- 27 Liu C M, Li Y L, Chen L. Modelling geomagnetically induced currents in Xinjiang 750 kV power grid in China. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES). Vancouver BC, Canada, 2013. 1–5

Characteristics of GIC interaction in a dual-voltage-level power network

LIU LianGuang¹, WANG KaiRang¹, GUO ShiXiao², ZHENG Kuan³, WEI Kai¹, LIU ChunMing¹,
WANG ZeZhong¹ & DONG Bo¹

¹ State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing China;

² State Grid Zhejiang Electric Power Company Hangzhou Power Supply Corporation, Hangzhou 310009, China;

³ State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China

The mechanism of GIC (Geomagnetically Induced Current) is complex, which is influenced by a number of factors. In previous studies, when calculating GIC in a 500 kV power network, the 220 kV part of the network and voltage levels below are usually ignored. China launched the construction of 750 kV in 2005, and 1000 kV network in 2009. Such power networks consists of a large proportion of autotransformers, which enable direct electrical connection between the primary and secondary windings. Therefore, it is of great importance to study the GIC interaction between windings and the relative factors. We established GIC models according to the 750 and 330 kV power network as well as the 1000 kV and 500 kV network in Gansu province in China, using GIC Benchmark which is a standard testing case proposed in 2012. In our models, we adopted different scenarios where we chose to include or ignore the GIC from secondary windings. We calculated the GIC level in Gansu main network, 1000 kV and 500 kV networks under the geomagnetic storm in November 9 and 10, 2004. Comparative analysis was made between different scenarios to showcase the GIC interaction and its influence. Results revealed the characteristics of GIC interaction between two voltage levels, as well as GIC contribution from secondary windings in 750 and 1000 kV autotransformers, which will provide support to future researches in GIC calculation, risk evaluation of geomagnetic storms and GIC suppression in the power network.

geomagnetic storm, geomagnetically induced current, dual-voltage-level power system, full-node model, interaction

doi: 10.1360/N092015-00107