论文

考虑 500 kV 影响的特高压电网 GIC-Q 扰动计算

刘连光^{①*}, 钱晨^①, 秦晓培^{①②}^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 国家电网河北涉县供电公司, 涉县 056400

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

收稿日期: 2016-04-02; 接受日期: 2016-08-12; 网络出版日期: 2016-09-26

国家自然科学基金(批准号: 51577060)和科技部国际合作计划(编号: 2010DFA04680)资助项目

摘要 计算地磁暴在电网衍生的地磁感应电流(GIC)流经变压器次生的 GIC 无功(GIC-Q)损耗增量, 以及认识全网变压器同时突发的 GIC-Q 扰动及其变电站节点的电压变化是地磁暴电网灾害防御需要研究、解决的问题. 提出了基于变压器 $U-I$ 曲线和铭牌参数计算 1000 kV 变压器 GIC-Q 损耗的方法, 以我国新建 1000 kV 及相关 500 kV 电网 GIC 计算数据为基础, 考虑 500 kV 变压器 GIC-Q 损耗对特高压电网 GIC-Q 扰动的影响, 运用牛顿法计算了特高压电网 GIC-Q 扰动下的全网节点电压波动, 分析了全网变压器 GIC-Q 损耗增大对 1000 kV 电网和 500 kV 电网节点电压的影响, 以及两个电压等级电网 GIC-Q 扰动的相互作用. 计算结果表明, 在正常运行方式下, 1000 kV 福州站的电压波动最大, 电压下降为 74.48 kV, 相对额定电压的偏移达到-7.13%, 超过了运行电压的偏移不超过额定电压 $\pm 5\%$ 的规程规定. 而 74.48 kV 的电压突然下降, 会不会导致电网 SVC 装置输出的无功功率大幅度的降低, 以及全网变压器无功消耗突然增大、全网 SVC 装置输出无功突然下降的效应是需要进一步研究的问题.

关键词 地磁感应电流, 特高压电网, GIC-Q 损耗, GIC-Q 扰动

1 引言

地磁暴会在电网产生频率为 0.0001~0.01 Hz 的地磁感应电流(geomagnetically induced current, GIC), 这种准直流会导致变压器半波饱和, 引起电网谐波电流增大、电压跌落、无功波动等危害^[1], 威胁电力变压器、电网的安全^[2], 并导致大量的输电线路和变压器跳闸及重大停电事故^[3~5]. 其中, 1989 年加拿大魁北克电网大停电的起因与 GIC 引发的谐波及无功

波动有关, 先是 SVC 跳闸、电网无功不平衡, 连锁反应导致全网电压崩溃^[6,7]. 国外针对该次大停电开展了大量研究, 建立了地磁暴效应的评价体系.

地磁暴侵害我国电网的研究也取得了重要的进展. 包括: 获得了地磁暴在电网衍生的 GIC 的观测数据^[8], 500 kV 电网实测 GIC 最大值为 75.5 A^[9]; 发现了在中低纬存在南北向的地电场比东西向的地电场更大的现象^[10]; 1000 kV 特高压电网 GIC 会达到 400 A 以上^[11]等研究成果. 这些成果揭示了地磁暴在电

引用格式: 刘连光, 钱晨, 秦晓培. 考虑 500 kV 影响的特高压电网 GIC-Q 扰动计算. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 1146–1156

Liu L G, Qian C, Qin X P. Calculation of geomagnetically induced currents reactive power loss disturbance in China's UHV power grid considering the influence of 500 kV power grid (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 1146–1156, doi: 10.1360/N092016-00126

网衍生灾害性 GIC 的机理, 探明了地磁暴对未来电网的严重危害. 我国首先开始大规模建设 1000 kV 特高压电网, 且输电线路采用 500 mm² 八分裂及以上规格导线, 其单位长度的直流电阻远远小于魁北克 735 kV 电网 400 mm² 四分裂导线的直流电阻, 虽然对同次地磁暴我国(中低纬)地区的地磁扰动(geomagnetic disturbance, GMD)相对弱, 但因特高压电网的单位长度的直流电阻小, 特高压电网中的 GIC 会很大^[11], 除了特高压电网的 GIC 问题外, GIC 侵害 1000 kV 特高压变压器次生的谐波、无功波动和振动、噪声等干扰也成为了需要研究的问题, 其中, GIC 次生的变压器无功损耗(简称 GIC-Q)变化会引起整个电网的无功或电压的突然的变化, 目前国内外未见考虑 500 kV 影响的特高压电网的 GIC-Q 扰动的研究报道.

在电力系统运行中, 认识 GIC 流经变压器的各种次生干扰对防灾具有重要的意义. 目前, 国外对 750 kV 及其以下变压器的 GIC 无功损耗和电网的 GIC-Q 扰动效应已有大量研究, 其中, 变压器 GIC-Q 损耗 K 值算法的研究较多^[12], 并已成为国际通用的变压器 GIC-Q 损耗算法, 并在工程中广泛应用^[13,14]. 由于国外未大规模建设特高压电网, 也未对特高压变压器的 K 值进行过研究, 以及 K 值的确定涉及特高压变压器的设计、制造参数, 文献[15]针对我国特高压电网广泛采用的单相自耦变压器, 提出了基于 $U-I$ 曲线法计算特高压变压器的 GIC-Q 损耗. 本文根据国内外变压器 GIC-Q 损耗算法和文献[16]特高压电网 GIC 的计算结果, 计算研究计及 500 kV 系统影响的特高压电网 GIC-Q 扰动效应, 以期防御我国特高压可能发生的地磁暴灾害提供依据.

2 变压器 GIC-Q 损耗模型

本文用文献[15]方法计算特高压变压器 GIC-Q 损耗和 K 值法计算 500 kV 变压器 GIC-Q 损耗, 再求取变压器的 GIC 无功扰动增量和电网效应.

2.1 特高压变压器的 GIC-Q 损耗模型

$U-I$ 曲线是指空载变压器电流方均根值 I_{rms} 随电压的方均根值 U_{rms} 变化曲线, 是变压器出厂厂家提供的数据, 反映变压器的基本电磁关系^[17], 基于电磁感应定律, 可将 U_{rms} 转换到磁链 ψ ^[15]:

$$\begin{aligned}\psi_k &= -\int_0^{\frac{\pi}{2}} e(t) dt = -\int_0^{\frac{\pi}{2}} (-u(t)) dt \\ &= \omega^{-1} \times \sqrt{2} \times U_{k_{rms}},\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\omega=2\pi f$, f 为频率.

以转换点 $k=3$ 为例进行电流转换求解, 其他节点依次类推, 则可得:

$$\begin{aligned}I_{3_{rms}}^2 &= \frac{\pi}{2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\psi_1}{X_1} \cdot \sin \theta \right)^2 d\theta \right. \\ &\quad + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(i_1 + \frac{\psi_3 \sin \theta - \psi_1}{X_2} \cdot \sin \theta \right)^2 d\theta \\ &\quad \left. + \int_{\theta_2}^{\theta_3} \left(i_2 + \frac{\psi_3 \sin \theta - \psi_2}{X_3} \cdot \sin \theta \right)^2 d\theta \right],\end{aligned}\quad (2)$$

式中, X_1, X_2 为 $\psi-i$ 曲线分段斜率, 由已求 $\psi-i$ 曲线段计算.

$$X_3 = \frac{\psi_3 - \psi_2}{i_3 - i_2}, \quad (3)$$

$$\theta_k = \arcsin \frac{\psi_k}{\psi_3}, \quad (4)$$

式中, i_3 为未知变量, i_1, i_2 为已知, 则方程式(2)~(4)构成非线性积分方程组. 采用梯形积分公式可以提取出变量 i_1 , 整理成下式, 求取 i_3 . 梯形积分采用 1° 为步长.

$$a \cdot i_3^2 + b \cdot i_3 + c = 0, \quad (5)$$

式中, a, b, c 为方程系数, i_3 提取后为已知值.

变压器 GIC-Q 损耗的计算流程如下:

- 1) 根据式(2)~(5), 由 $U-I$ 曲线计算 $\psi-i$ 曲线, 生成 $\psi-i$ 曲线函数 F 以备调用;
- 2) 输入磁链序列, 以 k 计数, 依次提取磁链;
- 3) 由投影法计算励磁电流, 并进行 FFT 分解:

$$\psi(t) = \psi_{ac}(t) + \psi_{dc} = F(i(t)) = F(i_{ac} + I_{dc}), \quad (6)$$

式中, $\psi_{ac}(t)$ 为正弦磁通, ψ_{dc} 为直流偏置磁通, i_{ac} 为交流励磁电流, I_{dc} 为励磁电流的直流分量, F 为 $\psi-i$ 函数, $\psi_{ac}(t)$, I_{dc} 为已知, ψ_{dc} , i_{ac} 为未知, 方程求解需设定初值进行迭代;

- 4) 计算变压器无功并存储. 由于 GIC 侵害下的励磁电压只存在基波正弦电压, 无功损耗算法可表示为

$$Q = \sqrt{Q^2} = \sqrt{\sum_1^n E_n^2 I_n^2 \sin^2 \phi_n}$$

$$= U_{50 \text{ Hz}} I_{50 \text{ Hz}} \sin 90^\circ = U_1 \cdot I_1; \quad (7)$$

5) 输出 Q , I_{dc} , ψ_{dc} 与 I_{dc} 对应的 Q 即为磁暴下变压器的 GIC-Q 损耗。

对自耦变压器, 由于原副绕组中都有直流电流的流通, 式(6)中的 I_{dc} 需按串联绕组和公共绕组流过的等效 GIC 计算^[18], 等效 I_{dc} 为

$$I_{\text{dc}} = \frac{N \cdot I_s + I_c}{N + 1}, \quad (8)$$

$$N = \frac{N_s}{N_c} = \frac{V_H}{V_L} - 1, \quad (9)$$

式中, N 为自耦变压器串联绕组匝数与公共绕组匝数之比, N_s 为自耦变压器串联绕组匝数, N_c 为自耦变压器公共绕组匝数, V_H , V_L 是变压器额定电压和实际电压, I_s 为流过串联绕组的电流, I_c 为流过公共绕组的电流。

文献[15]以 ODFPS-1000000/1000 单相自耦变为例验证了算法有效性, 证明了基于变压器 V - I 曲线和铭牌参数的 GIC-Q 损耗算法适用工程计算。

2.2 其他变压器的 GIC-Q 损耗模型

Walling 和 Khan^[6]通过仿真计算, 首次证明通过变压器绕组的 GIC 与变压器铁芯吸收的无功成线性关系。2001 年, Dong 等人^[19]首先提出了计算高压、超高压变压器 GIC-Q 损耗的 K 值算法。变压器绕组的直流电流越大, 励磁电压越高, 无功的消耗量也越大, 对每台变压器来说, 变压器的 GIC-Q 损耗模型为^[12,20]

$$Q_{\text{Loss}} = V_{\text{pu}} K I_{\text{GIC}}, \quad (10)$$

式中, Q_{Loss} 为变压器的 GIC-Q 损耗, 单位为 Mvar; V_{pu} 为变压器实际运行端电压的标么值, K 为变压器无功损耗系数, 单位为 Mvar/A, I_{GIC} 为流过变压器绕组的单相 GIC, 单位为 A。

在大型的电力系统 GIC-Q 扰动效应研究中, 式(10)适用条件是每台变压器的 K 值已知, 通常取 K 为系统默认值, 取 V_{pu} 为变压器高压侧实际运行电压标么值, 因此, 式(10)可改写为^[12]

$$Q_{\text{Loss}} = V_{\text{pu}} K \left(\frac{V_{\text{Nom kV}}}{V_{\text{Nom kV, Assumed}}} \right) I_{\text{GIC}}, \quad (11)$$

式中, $V_{\text{Nom kV}}$ 为变压器高压绕组侧的额定电压, $V_{\text{Nom kV, Assumed}}$ 为 500 kV。

此外, 对自耦变压器, 式(11)中的 I_{GIC} 不再等于

流过变压器接地点的电流, 此时的 I_{GIC} 取决于多个绕组, 需对其进行归算, 方法如下:

$$I_{\text{GIC}} = \left| \frac{a_i I_H + I_L}{a_i} \right|, \quad (12)$$

式中, I_H 为流入自耦变压器高压侧绕组或串联绕组的单相 GIC, I_L 为自耦变压器低压侧绕组或公共绕组中的单相 GIC, a_i 为自耦变压器变比, 表示为

$$a_i = \frac{N_H}{N_L} = \frac{N_s + N_c}{N_c}, \quad (13)$$

式中, N_s 为自耦变压器串联绕组匝数, N_c 为自耦变压器公共绕组匝数。

文献[19]证明了式(10)~(13)的正确性, 测量值与公式计算值差异较小, 已成为国际通用 GIC-Q 损耗模型, 并得到广泛应用^[13,14], 需注意的是, 由于国外只针对 750 kV 及以下电压等级的电力变压器做过研究, 因此, 式(10)~(13)只适用于计算 750 kV 及以下电压等级变压器的 GIC 无功损耗。

3 电网 GIC-Q 扰动计算

电网 GIC-Q 扰动计算工作量大, 以及 GIC 有最高电压等级越电网 GIC 最大的特征^[16], 国外研究通常只算最高电压等级, 但对特高压电网无疑会带来误差, 本文计算计及 500 kV 电网 GIC-Q 影响。

3.1 特高压电网 GIC 建模计算

地磁暴地电场与深层大地的电性及结构有关, 由于缺乏 GIC 精细计算要求的大地电磁探测数据, 准确计算大范围的地电场和大规模的电网 GIC 非常困难。文献[16]根据前期研究成果, 提出以 1 V/km 地电场评价我国大规模电网的 GIC, 完成了图 1 我国建成和在建 1000 kV 及相关 500 kV 电网 GIC 理论计算, 揭示了双电压等级电网 GIC 相互影响的特征及规律。本文根据文献[16]GIC 计算结果, 研究变压器 GIC-Q 损耗和电网 GIC-Q 扰动效应, 对 GIC 计算不再赘述, 图 1 电网 GIC 计算参见文献[16]及相关文献。

3.2 变压器 GIC-Q 损耗计算

1000 kV 特高压电网的变压器均为单相自耦变压器, 主体变铁芯采用单相四柱或五柱式结构。根据文献[16]1000 kV 电网 GIC 计算结果, 利用式(8), 将

图 1 (网络版彩图)计及 500 kV 的特高压电网地理接线图

变压器中性点流过的 GIC 归算为 I_{dc} , 根据变压器厂家提供的数据, 采用 $U-I$ 曲线法计算 1000 kV 变压器的 GIC-Q 损耗. 对 500 kV 变压器, 取 K 值为 1.18^[19], 计算 500 kV 变压器的 GIC-Q 损耗, I_{dc} , I_{GIC} 均具有现实性. 在 1 V/km 的东向和北向电场下的全部 1000 和 500 kV 站点的 GIC-Q 损耗计算结果见表 1 和 2.

3.3 1000 和 500 kV 电网 GIC-Q 扰动计算

为分析电网 GIC-Q 损耗对各个节点电压的影响, 本文利用电力系统综合分析程序, 以特高压 2015 年典型潮流运行方式的数据为基础, 采用牛顿法分别计算在 1 V/km 东向电场和北向电场下, 1000 和 500 kV 双电压等级电网的 GIC-Q 扰动, 评估 1000 和 500 kV 等级电网电压水平, 计算结果见图 2~4 所示, 图中阴影部分为电网 GIC-Q 扰动后电压下降值, 实心部分为电网 GIC-Q 扰动后各节点电压值.

表 1 1000 kV 变压器 GIC-Q 损耗计算结果

1000 kV 站点	I_{dc} (A)		GIC-Q (Mvar)	
	东向电场	北向电场	东向电场	北向电场
皖南	130.78	36.84	100.26	31.06
淮南	383.79	200.01	258.29	146.92
南京	27.81	94.61	23.94	74.48
泰州	106.06	100.13	82.76	78.49
苏州	61.39	19.77	49.86	17.61
上海	345.76	37.92	236.35	31.90
浙北	14.36	73.92	13.46	59.25
浙中	125.80	27.55	96.77	23.73
浙南	254.21	63.86	181.38	51.72
福州	133.82	249.28	102.38	178.31

表 2 500 kV 变压器 GIC-Q 损耗计算结果

500 kV 站点	I_{GIC} (A)		GIC-Q (Mvar)	
	东向电场	北向电场	东向电场	北向电场
芜湖东	33.42	39.65	13.15	15.60
龙王山	3.94	3.65	1.55	1.44
盐都	39.39	126.78	15.49	49.87
凤城	12.94	9.23	5.09	3.63
石牌	26.62	29.50	10.47	11.60
黄渡	70.65	9.98	27.79	3.93
练塘	2.61	25.35	1.03	9.97
妙西	14.66	17.03	5.76	6.70
瓶窑	12.16	37.68	4.78	14.82
含山	28.32	36.98	11.14	14.55
乔司	38.29	31.99	15.06	12.58
兰亭	66.18	88.66	26.03	34.87
凤仪	61.20	65.07	24.07	25.60

图2 (网络版彩图)GIC-Q 扰动后 1000 kV 节点电压

图3 (网络版彩图)GIC-Q 扰动后 500 kV 节点电压

图4 (网络版彩图)受扰动的 1000 与 500 kV 节点电压偏移百分比

由图 2 和 4 可见, 发生 GIC-Q 扰动后, 1000 kV 电网的节点电压都有不同程度的下降. 在东向电场下, 1000 kV 节点电压偏移百分比在 $-1.10\% \sim -7.13\%$ 之间, 电压波动最大的是福州站, 下降 74.48 kV, 相对于其正常运行时的电压的偏移百分比为 -7.13% , 北向电场下, 1000 kV 节点的电压偏移百分比在 $-0.95\% \sim -5.56\%$ 之间, 电压波动最大的也是福州站, 下降 58.07 kV, 相对其正常电压的偏移百分比为 -5.56% , 而福州站的 GIC 和 GIC-Q 损耗并不是全网最大, 由图 1 可见, 福州站位于电网末端, 为终端变电站, 且位于电网终端的淮南、上海站也有类似的特征, 因此, 电网的 GIC-Q 扰动存在终端变电站效应.

由图 3 可见, 500 kV 节点电压受到 GIC-Q 扰动的变化较小, 电压波动较大的节点为芜湖东、练塘站, 分别下降了 14.82 和 13.55 kV, 相对其正常电压的偏移百分比为 -2.77% 和 -2.57% , 而这两个变电站的 GIC-Q 损耗仅为 13.15 和 1.03 Mvar, 结合图 1 地理接线图可见, 这两个变电站分别与受 GIC-Q 扰动大的淮南、上海站直接相连或邻近, 说明电压波动大的节点会影响与其直接相连或邻近的其他站点, 即 GIC-Q 扰动的节点电压波动具有区域性^[21].

计算发现, 加了电网 GIC-Q 扰动后, 除了各节点电压发生变化, 线路的功率也有变化. 各线路的有功功率流向没有改变, 有功功率的大小也几乎没有变化, 而一些线路的无功功率的流向和大小发生了改变. 因此, 下面着重分析线路上无功功率的变化情况, 结合节点电压计算结果作图 5 和 6, 图中的箭头表示无功功率的流向, 黑色的箭头表示无功功率的方向与正常运行时方向一致, 白色箭头表示与正常运行时方向相反, 线路上无功功率大小的变化用线段粗细表示, 除了线路苏州-上海上的无功功率是增加的以外, 其余均为减小, 1000 kV 变电站用灰色字体表示, 500 kV 变电站用黑色字体表示.

从图 5 和 6 可看出, 东向电场、北向电场下, 线路上流过的无功功率发生了不同程度的变化, 1000 kV 线路的无功功率大小变化明显, 福州-浙南线路的无功功率均出现了功率反向, 500 kV 线路无功功率变化相对 1000 kV 线路要小. 东向电场下, 淮南-南京线路无功功率减少 157.36 Mvar, 淮南-南京线路无功功率减少 94.02 Mvar, 苏州-上海线路流过的无功功率增加 170.33 Mvar, 浙中-浙北、浙中-浙南线路无功功率减少超过 200 Mvar, 浙南-福州线路出现无功功率反

图 5 东向电场下 GIC-Q 扰动后线路无功功率变化情况

图 6 北向电场下 GIC-Q 扰动后线路无功功率变化情况

向, 变化值也超过 200 Mvar; 500 kV 线路练塘-上海、凤仪-浙中、兰亭-浙中、黄渡-苏州、芜湖东-皖南上流过的无功功率均减少超过 30 Mvar. 北向电场下的计算结果与东向电场下的结果相似, 不再赘述. 从两个电场下的计算结果可以看出, GIC-Q 扰动会导致线路无功功率的流动发生改变, 与电压下降大的站点直接相连的线路的无功功率变化明显, 例如图 5 和 6 中的淮南-皖南、淮南-南京、苏州-上海、福州-浙南、浙南-浙中的 1000 kV 线路, 以及练塘-上海、凤仪-浙中、兰亭-浙中 500 kV 输电线路.

忽略 500 kV 电网无功扰动的特高压电网节点电压计算结果和电压偏移百分比如图 7 和 8 所示. 值得注意的是, 如果只考虑 1000 kV 电网的 GIC-Q 扰动, 单电压等级电网 GIC-Q 扰动效应计算结果与双电压等级电网计算结果有很大区别, 将图 7 中的 1000 kV 电网的计算结果与图 2 对比, 可发现 1000 kV 单电压等级电网的 GIC-Q 扰动计算结果偏大, 例如在 1 V/km 东向电场下的单电压等级 GIC-Q 扰动计算结果

中, 福州站电压下降 111.89 kV, 电压偏移百分比为 -11.41%; 浙南站电压下降 97.7 kV, 电压偏移百分比为 -9.70%; 与双电压等级电网 GIC-Q 扰动计算结果相比要大得多, 这会造成很大误差, 因此, 计算 1000 kV 特高压电网的 GIC-Q 扰动效应不能忽略次级电压等级电网的作用.

4 电网 GIC-Q 的相互作用

为揭示双电压等级电网 GIC-Q 的相互作用的特性, 分别计算不同情况的电网 GIC-Q 扰动, 研究双电

图 7 (网络版彩图)1000 kV 单电压等级 GIC-Q 扰动计算结果

图 8 (网络版彩图)单电压等级受扰动的 1000 kV 节点电压偏移百分比

压等级电网 GIC-Q 扰动的相互影响. 为方便分析, 计算结果以节点电压变化的对比结果给出.

4.1 500 kV 电网 GIC-Q 对 1000 kV 电网影响

只考虑 500 kV 电网 GIC-Q 对 1000 kV 电网影响计算结果对比图如图 9 和 10 所示. 其中, 1 V/km 东向电场下, 1000 kV 节点电压波动值超过 1 kV 的有福州、皖南、浙北、浙中、浙南站, 电压波动最大的是福州站, 下降了 2.13 kV; 1 V/km 北向电场下, 1000 kV 节点电压波动值超过 1 kV 的有福州、上海、皖南、浙北、浙南、浙中站, 电压波动值最大的也是福州站, 下降 2.63 kV. 可看出, 只考虑 500 kV 电网的 GIC-Q

图 9 (网络版彩图)1 V/km 东向电场下 500 kV 电网 GIC-Q 扰动后 1000 kV 节点电压变化对比图

图 10 (网络版彩图)1 V/km 北向电场下 500 kV 电网 GIC-Q 扰动后 1000 kV 节点电压变化对比图

扰动, 不论是在东向电场下, 还是在北向电场下, 1000 kV 节点电压的波动值都很小, 说明 500 kV 电网 GIC-Q 扰动对 1000 kV 电网基本没有影响.

500 kV 电网的 GIC-Q 扰动对 1000 kV 节点电压波动影响小的主要原因是: 500 kV 电网的 GIC 相对 1000 kV 要小的多, 变压器的 GIC-Q 损耗也小, 由表 2 可知, 500 kV 变电站 GIC-Q 损耗值最大仅为 49.87 Mvar, 且 500 kV 变电站的 GIC-Q 损耗数值大体都在 10 Mvar 左右, 与 1000 kV 变电站的 GIC-Q 损耗相比, 相差甚大, 因此 500 kV 的 GIC-Q 损耗对 1000 kV 电网的影响很小. 这也表明, 1000 kV 电网的 GIC-Q 扰动对自身节点电压的变化起主导的作用.

只加 500 kV 电网 GIC-Q 扰动时, 线路无功功率流动变化情况如图 11 和 12 所示. 东向电场下, 1000 kV 线路无功功率变化很小, 无功功率变化最大的是线路浙北-浙中, 减少了 7.47 Mvar, 500 kV 线路黄渡-苏州、石牌-苏州、兰亭-浙中、凤仪-浙中、乔司-浙

图 11 东向电场下 500 kV 电网 GIC-Q 扰动后线路无功功率变化情况

图 12 北向电场下 500 kV 电网 GIC-Q 扰动后线路无功功率变化情况

北、芜湖东-皖南变化较为明显, 线路流过的无功功率变化值分别是 16.15, 10.08, 25.72, 23.62, 11.17, 12.47 Mvar, 其余 500 kV 线路无功功率变化量都在 5 Mvar 及以下, 易见, 500 kV 线路无功功率变化量与表 2 中 500 kV 变电站的 GIC-Q 损耗十分相近, 北向电场下的计算结果与东向电场的类似. 因此, 只加 500 kV 电网的 GIC-Q 扰动, 对 1000 kV 线路的无功功率流动几乎无影响, 仅 500 kV 线路上的无功功率有明显变化, 与电压下降大的 500 kV 站点相连的线路变化大, 且变化量与该 500 kV 变电站 GIC-Q 损耗具有一致性. 这表明, 500 kV 电网 GIC-Q 扰动对 1000 kV 线路的无功功率流动几乎没有影响, 只对 500 kV 线路有较大影响, 这与 500 kV 电网 GIC-Q 扰动对 1000 kV 节点电压的作用相似.

4.2 1000 kV 电网 GIC-Q 对 500 kV 电网影响

1000 kV 电网 GIC-Q 扰动对 500 kV 电网影响计算结果对比图如图 13 和 14 所示. 可见, 受 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动的影响, 500 kV 电网的节点电压均有一定程度的下降, 东向电场下, 凤仪站下降 11.33kV, 练塘站下降 13.09kV, 芜湖东站下降 13.32 kV, 其余 500 kV 节点电压波动值都在 10 kV 以内, 北向电场下, 500 kV 节点电压波动值均在 10 kV 以内, 其中, 芜湖东站母线的电压波动值最大, 达 7.53 kV.

与图 2 和 3 全网加 GIC-Q 扰动的计算结果对比可知, 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动对 500 kV 电网的影响几乎与全网加 GIC-Q 扰动后的计算结果近似, 显然, 仅加 1000 kV 电网的 GIC-Q 扰动对 500 kV 节点电压影响很大. 分析可知, 这些 500 kV 节点均是 与 1000 kV 节点直接相连, 且 GIC-Q 损耗大的 1000 kV 站点会对与其直接相连或相邻的 500 kV 节点造成一定影响, 电压下降很大的练塘站就是与上海站直接相连的 500 kV 站点, 东向电场下, 上海站的 GIC-Q 损耗达 236.35 Mvar, 而练塘站的 GIC-Q 损耗为 1.03 Mvar, 淮南站的 GIC-Q 损耗达 258.29 Mvar, 而与其相邻的芜湖东站 GIC-Q 损耗仅 13.15 Mvar, 北向电场下, 芜湖东站的 GIC-Q 损耗只有 15.60 Mvar, 但是它与 GIC-Q 损耗为 146.92 Mvar 的淮南站相邻, 受淮南站的影响, 使其电压也出现了较大变化.

只加 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动时, 线路无功功率流动如图 15 和 16 所示. 与图 5 和 6 对比可见, 只加 1000 kV 的 GIC-Q 扰动时, 1000 kV 线路上流动的无

图 13 (网络版彩图)1 V/km 东向电场下 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动后 500 kV 节点电压变化对比图

图 14 (网络版彩图)1 V/km 北向电场下 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动后 500 kV 节点电压变化对比图

功功率变化情况与加全部 GIC-Q 扰动时的计算结果基本一致, 部分 500 kV 线路流过的无功功率也有明显变化. 东向电场下, 淮南-南京线路无功功率减少 155.29 Mvar, 淮南-南京线路无功功率减少 91.14 Mvar, 苏州-上海线路流过的无功功率增加 168.51 Mvar, 浙中-浙北、浙中-浙南线路无功功率减少超过 200 Mvar, 浙南-福州线路出现无功功率反向, 变化值也超过 200 Mvar; 500 kV 线路练塘-上海、黄渡-苏州上流过的无功功率均减少超过 30 Mvar, 兰亭-浙

图 15 东向电场下 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动后线路无功功率变化情况

图 16 北向电场下 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动后线路无功功率变化情况

中、凤仪-浙中、芜湖东-皖南线路上的无功功率变化量分别为 7.54, 10.71, 11.82 Mvar, 其余 500 kV 线路上流过的无功功率的变化都在 5 Mvar 左右, 北向电场下的计算结果与东向电场的结果一致. 可见, 1000 kV 电网的 GIC-Q 扰动不只会影响 1000 kV 线路的无功功率, 还会对 500 kV 线路的无功功率造成明显影响, 尤其是与电压下降较大的 1000 kV 站点相连的 500 kV 线路, 无功功率变化更加明显, 例如线路练塘-上海、兰亭-浙中、凤仪-浙中, 此外仅考虑 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动下的计算结果与考虑全网 GIC-Q 扰动下的计算结果非常相似, 说明 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动起主导作用, 与 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动对 500 kV 节点电压的作用具有相似性.

5 结论

1000 kV 电网的 GIC 比 750 和 500 kV 电网 GIC

更大^[16], 为探明 1000 kV 电网的 GIC-Q 扰动量值和节点电压效应, 以及 500 kV 电网 GIC 对 1000 kV 特高压电网 GIC 的影响, 本文根据文献[16]的电网 GIC 计算数据, 计算研究了 1000 和 500 kV 等级电网 GIC-Q 扰动及节点电压、输电线路功率的变化. 得到的研究结论和发现的 500 kV 电网 GIC 的影响如下:

(1) 本文的研究结果源于 2004 年 11 月 10 日强地磁暴的驱动^[16], 但该次地磁暴的强度低于 1989 年 3 月 13 日的地磁暴. 由于 GIC 次生的谐波及无功波动诱发电网 SVC 装置跳闸, 导致电网的无功功率不平衡, 并发生连锁反应是 1989 年魁北克电网电压崩溃的原因. 因此, 本文理论计算得到的、在正常运行方式下, 1000 kV 福州站的电压波动最大, 电压下降为 74.48 kV, 相对于额定电压的偏移会达到-7.13%的水平, 已超过运行电压偏移不超过额定电压 $\pm 5\%$ 的规定. 尤其是, 74.48 kV 电压突然下降, 会不会导致电网 SVC 装置输出的无功功率的大幅度降低, 以及全网变压器无功消耗突然增大、全网 SVC 装置输出无功突然大幅下降效应是下一步的研究课题.

(2) 本文的 1000 和 500 kV 电网 GIC-Q 扰动的相互作用, 以及 GIC-Q 扰动对 1000 和 500 kV 电网节点电压影响的计算结果表明, 500 kV 电网的 GIC-Q 扰动对 1000 kV 电网节点电压的影响小, 而 1000 kV 电网的 GIC-Q 扰动对 500 kV 电网的影响很大, 尤其是与变压器 GIC-Q 损耗较大的 1000 kV 变电站直接相连的 500 kV 站点, 受 1000 kV 电网 GIC-Q 扰动的影响会比较大. 该项成果不仅是通过我国 1000 和 500 kV 电网的研究, 证明国外 GIC-Q 扰动大的变电站会波及附近的变电站, 电网 GIC-Q 扰动具有区域性的结论, 并且证明图 1 中的福州站和上海站是我国电网地磁暴灾害防灾研究关注的重点, 因为图 1 中的福州站和上海站是终端变电站的局面已不会改变, 终端站是地磁暴灾害的防治重点.

(3) 电网 GIC-Q 扰动不仅会造成节点电压下降, 还会影响输电线路流过的无功功率的大小、方向. 计算结果表明, 电网 GIC-Q 扰动下, 1 V/km 东向、北向电场下的 1000 kV 输电线路福州-浙南上流过的无功功率均出现反向, 1000 kV 特高压输电线路流过的无功功率变化很大, 特别是与电压下降大的节点直接相连的线路, 500 kV 输电线路流过的无功功率变化相对较小, 只有与电压下降大的节点直接相连的线路上流过的无功功率变化明显, 而输电线路

流过的有功功率不受电网 GIC-Q 扰动的影响, 也就是说, 电网 GIC-Q 扰动只对输电线路上的无功功率的流动有影响。

(4) 不同电压等级电网的 GIC-Q 扰动之间会互相作用, 1000 kV 特高压电网的 GIC-Q 扰动对 500 kV 输电线路的无功功率流动的影响很大, 特别是与电压下降大的 1000 kV 终端变电站直接连接的 500 kV

输电线路上的无功功率变化显著, 500 kV 电网的 GIC-Q 扰动对 1000 kV 特高压电网输电线路无功功率流动的影响非常小, 而各输电线路上的有功功率均不受 1000 和 500 kV 电网 GIC-Q 扰动的影响, 即不同电压等级电网 GIC-Q 扰动的相互作用只影响输电线路上的无功功率的流动, 与终端变电站相连的输电线路也是地磁暴灾害的防治重点。

参考文献

- 1 Albertson V, Thorson J, Clayton R, et al. Solar-induced-currents in power systems: Cause and effects. *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1973, PAS-92: 471–477
- 2 Hutchins T R, Overbye T J. The effect of geomagnetic disturbances on the electric grid and appropriate mitigation strategies. In: *North American Power Symposium (NAPS)*, 2011, Boston, MA, 2011. 1–5
- 3 Kappenman J G. Geomagnetic storms and their impact on power system. *IEEE Power Eng Rev*, 1996, 16: 5–8
- 4 Bolduc L. GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2002, 64: 1793–1802
- 5 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
- 6 Walling R A, Khan A N. Characteristics of transformer exciting-current during geomagnetic disturbances. *IEEE T Power Deliver*, 1991, 6: 1707–1714
- 7 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, 6: 1709–1719
- 8 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
- 9 Liu C M, Liu L G, Pirjola R. Geomagnetically induced currents in the high-voltage power grid in China. *IEEE T Power Deliver*, 2009, 24: 2368–2374
- 10 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
- 11 刘连光, 郭世晓, 魏恺, 等. 基于全节点模型的三华电网地磁感应电流计算. *电网技术*, 2014, 7: 1946–1952
- 12 Overbye T J, Hutchins T R, Shetye K, et al. Integration of geomagnetic disturbance modeling into the power flow: A methodology for large-scale system studies. In: *North American Power Symposium (NAPS)*, 2012, Champaign, IL, 2012. 1–7
- 13 Shetye K S, Overbye T J. Parametric steady-state voltage stability assessment of power systems using benchmark scenarios of geomagnetic disturbances. In: *Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 2015 IEEE, Champaign, IL, 2015. 1–7
- 14 Demiray T, Beccuti G, Andersson G. Risk assessment of the impact of geomagnetic disturbances on the transmission grid in Switzerland. In: *Power and Energy Society General Meeting (PES)*, 2013 IEEE, Vancouver, BC, 2013. 1–5
- 15 刘连光, 秦晓培, 葛小宁. 基于 $U-I$ 曲线的单相自耦变 GIC 无功损耗算法. *电力自动化设备*, 2015, 12: 55–59, 65
- 16 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, 12: 1311–1320
- 17 潘超, 王梦纯, 蔡国伟, 等. 变压器直流偏磁场路耦合计算中的磁化曲线拟合. *电力自动化设备*, 2014, 4: 49–52, 58
- 18 Albertson V, Kappenman J, Mohan N, et al. Load-flow studies in the presence of geomagnetically-induced currents. *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1981, PAS-100: 594–607
- 19 Dong X Z, Liu Y L, Kappenman J G. Comparative analysis of exciting current harmonics and reactive power consumption from GIC saturated transformers. In: *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001. IEEE, Columbus, OH, 2001, 1: 318–322
- 20 Kappenman J. Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid. *Metatech Corporation Report Meta-R-319*, 2010
- 21 Schlueter R A. A voltage stability security assessment method. *IEEE T Power Syst*, 1998, 13: 1423–1438

Calculation of geomagnetically induced currents reactive power loss disturbance in China's UHV power grid considering the influence of 500 kV power grid

LIU LianGuang¹, QIAN Chen¹ & QIN XiaoPei^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² State Grid Hebei Electric Power Company Shexian Supply Corporation, Shexian 056400, China

Geomagnetically induced currents (GIC) in power systems which are generated during magnetic storms, increased reactive power consumption in transformers, it is necessary for geomagnetic storms disaster prevention in power system to calculate GIC-Q increment and recognize voltage changes of substation nodes under simultaneity and prurption of massive GIC-Q loss disturbance in whole power grid. A method combines $U-I$ curve and transformers' reactive loss coefficient parameter K is proposed to calculate transformers' GIC-Q increment, based on the GIC data of 1000 kV UHV power network in China, and considering the influence of 500 kV transformers' GIC-Q loss on 1000 kV power grid, we used the Newton method to calculate voltage fluctuation of 1000 and 500 kV power grid under GIC-Q disturbance. At last, the impact of the simultaneity of massive GIC-Q loss on the 1000 and 500 kV grid is analyzed, we investigated the mutual influence between these two power grids under all circumstances. The results show that 1000 kV Fuzhou substation has a maximum voltage fluctuation that drops by 74.48 kV, whose voltage deviation compared with normal shows a decrease of 7.13%, which beyonds the regulation that the operating voltage deviation should not exceed $\pm 5\%$. And whether the suddenly voltage drop of 74.48 kV can lead to the reduction of SVC devices reactive power output, and the simultaneity of massive GIC-Q loss as well as the suddenly reduction effect of SVC reactive power output need to be further researched.

geomagnetically induced currents, UHV power grid, GIC-Q loss, GIC-Q disturbance

doi: 10.1360/N092016-00126