基于 GIC 无功损耗严重度指标的电网地磁暴 易损区识别方法

徐旖旎,康小宁,赵 冲,郭明达,李更丰 (西安交通大学 陕西省智能电网重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:首先分析了电网在不同感应地电场强度和方向条件下各变电站无功损耗的变化规律,定义了变电站地 磁感应电流(GIC)无功损耗严重度指标,指标本身仅对实际的无功损耗做归一化处理,未改变各变电站之间 无功损耗大小的相对关系。基于该指标提出了给定系统中易受地磁暴灾害区域的识别方法,可以为地磁暴 影响下的电网规划和系统调度人员的操作提供依据。最后以750 kV规划电网为例,验证了所提指标和方法 的可行性。

关键词:地磁暴;GIC 无功损耗;GIC 无功损耗严重度指标;概率分布;标准正态分布 中图分类号:TM 761
文献标志码:A DOI:10.16

DOI:10.16081/j.epae.201909036

0 引言

现有电网的可靠性已经很高,但也有一些极端 事件可能导致大规模、持续时间较长的停电。NERC (North American Electric Reliability Corporation)称 这些极端事件为高影响低频率事件(HILFs),并对其 进行划分,地磁扰动(GMD)属于其中的第3类^[1]。 根据法拉第电磁感应定律,地球磁场强度和方向的 急剧、不规则变化(dB/dt)会在大地表面感应出电 场,即感应地电场。在感应地电场的作用下,系统接 地点之间形成地表感应电动势,在中性点接地的变 压器、大地和输电线路构成的回路中,电动势驱动产 生地磁感应电流(GIC)^[2]。

当准直流的 GIC 叠加到交流系统, GIC 流过变 压器中性点及绕组时,将导致变压器铁芯的半波饱 和,从而引起变压器的温升、振动、谐波等效应。在 正序网络中,谐波效应可以由地磁暴条件下变压器 增加的无功损耗来表征^[1]。

文献[3-4]分析了地磁暴条件下美国电网的整体响应特性,计算了地磁暴对电网的威胁程度并提出了大电网预防GMD的方法。文献[2]将GIC作为衡量电网磁暴灾害水平的指标,将磁暴电网风险分为"低"、"中"、"高"和"极度"以反映地磁暴对系统的影响程度。文献[5]计算了无功补偿装置带负荷能力的极限,对系统的电压稳定性进行了评估。文献[6]假设电力系统的故障模型服从泊松分布,提出了计及多种不确定性因素的暂态电压稳定分析方法。2012年NERC对地磁暴条件下电力系统的可靠性进行了特殊评估^[7],指明了由于地磁暴本身出现的概

收稿日期:2018-11-03;修回日期:2019-06-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0800100) Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFC0800100) 率小,且缺乏历史数据,现阶段还无法确切评估 GMD对电力系统的影响,评价的指标体系还不完善。

在 GIC 的影响下,变压器的无功损耗取决于变 压器类型及其所在变电站母线相连的输电线路走 向、长度等多种因素。1989年强磁暴导致的加拿大 魁北克大停电是迄今为止电网遭受磁暴灾害最严重 的一次事故,其连锁故障导致大停电的根本原因是 GIC 流过变压器中性点,变压器铁芯半波饱和,产生 大量无功损耗,59 s内7个静态无功补偿器(SVC)相 继跳闸^[8]从而导致系统电压崩溃。2003年磁暴事件 造成瑞典马尔默近5万用户停电1h,其根本上也是 变压器的无功损耗增大、SVC过载所致。目前,变压 器的无功损耗算法^[7]已被国际接受,并在工程中有 广泛应用^[9-10]。

综上所述,本文提出地磁暴环境下变电站GIC 无功损耗严重度指标,并根据指标识别给定系统中 易受地磁暴灾害的区域(变电站)的通用方法。以 750 kV规划电网为例,验证所提方法的有效性。受 技术和经济条件的限制,为抑制GIC对电力系统的影 响,在给定网络中应优先考虑对识别出的易损区域 施加无功补偿措施,提出的识别方法可以为地磁暴影 响下的电网规划和系统调度人员的操作提供依据。

1 地磁暴条件下变压器无功损耗计算原理

地磁暴影响下电网流通的GIC已经有了较为成 熟的算法^[3],根据法拉第电磁感应定律,GMD将在地 面产生感应电场,线路感应电压为地电场沿着该线 路走向的积分,假设感应地电场恒定,积分值只与线 路两端的地理位置有关^[11],即仅与变压器的地理坐 标有关^[12]。

$$U = E_{\rm E} L_{\rm E} + E_{\rm N} L_{\rm N} \tag{1}$$

其中,U为线路感应电压; $E_{\rm E}$ 、 $E_{\rm N}$ 分别为东向和北向 感应地电场值(单位为V / km); $L_{\rm E}$ 、 $L_{\rm N}$ 分别为两变电 站间的东向和北向距离。在已知变电站地理位置的 条件下,两站间距离的计算方法可参考文献[12]。

基于系统的潮流计算模型,在网络的节点导纳 矩阵中引入变压器的中性点节点,对给定电网进行 直流建模,采用节点导纳法,对系统任意节点*i*有:

$$J_{i} = v_{i}y_{i} + \sum_{k=1}^{D} v_{i}y_{ki} - \sum_{k=1}^{D} v_{k}y_{ki}$$
(2)

其中,*J_i*为节点*i*的等效注入电流源,可通过感应地 电场计算得出;*v_i、v_k*分别为节点*i、k*的电压;*y_i*为节点 *i*的自导纳;*y_{ki}*为节点*k*和节点*i*之间的线路导纳;*D* 为节点数量;*J*为节点注入电流源矩阵;*Y*为等效直 流网络的节点导纳矩阵;*V*为节点电压矩阵。现已 知*J、Y*,可首先求出地磁暴影响下系统各节点电压, 然后求得各线路上流通的GIC和流经变压器中性点 入地的GIC。

Walling等^[13]通过仿真,证明了通过变压器绕组的GIC与变压器铁芯增加的无功损耗呈线性关系。 文献[14]给出了计算变压器无功损耗的数学模型, 变压器的正序无功损耗与流过变压器高低压绕组线 圈中的电流以及交流电压相关^[15]。

$$Q_{\rm loss} = K V_{\rm pu} I_{\rm GIC \ eff} \tag{3}$$

其中, Q_{loss} 为GIC流过变压器绕组的等效正序无功损耗;K为通过实验测量得到的500 kV电压等级下变压器的无功损耗系数,与变压器的类型直接相关, $K \in \{[1,1.18],[0.33,0.5],0.29,[0.66,0.7]\}^{[16]},单位为Mvar/A,4个子集分别对应单相变压器、三相壳式变压器、三相壳式变压器和三相五柱芯式变压器;<math>V_{pu}=VV_e/500,V$ 为变压器实际运行电压的标幺值, V_e 为变压器高压侧额定电压等级; I_{GIC_eff} 为流过变压器高低压线圈的等效交流电流。针对Y- Δ 联结的变压器,由于低压绕组为 Δ 接线,GIC无法流出该绕组,所以有效的 I_{GIC_eff} 即为流过高压绕组的GIC。对于普通的Yn-Yn联结的变压器,有^[16]:

$$I_{\text{GIC}_{\text{eff}}} = \left| (NI_{\text{h}} + I_{\text{l}})/N \right| \tag{4}$$

其中,N为变压器变比;I_h和I_i分别为流过变压器高 压绕组和低压绕组的GIC。自耦变压器的变比为:

$$N_{\rm A} = N_{\rm s} / N_{\rm c} = N - 1$$
 (5)

其中,*N*_A为自耦变压器高低压绕组匝数比;*N*_s和*N*_c分别为自耦变压器串联绕组和公共绕组上的匝数。

若将自耦变压器的变比表达式改写为式(6)的 形式,则自耦变压器的GIC有效值与普通变压器的 相同。

$$N = N_{\rm h} / N_{\rm l} = (N_{\rm s} + N_{\rm c}) / N_{\rm c}$$
 (6)

其中,N_h和N₁分别为自耦变压器等效的高、低压绕组 匝数。由此,式(4)适用于网络中所有变压器的GIC 等效交流电流计算。需要指出的是,*I*_{GIC_eff}是流过变 压器的等效GIC电流,仍是准直流电流,而*Q*_{loss}则是 等效的交流无功损耗。

2 规划电网的无功损耗计算分析

基于现有的研究结论,影响GIC无功损耗的因 素主要包括电网的地理位置信息、输电线路的走向、 由地磁扰动引起的感应地电场的强度和方向等。若 给定区域电网,即确定网络的地理位置、输电线路长 度、走向等信息,那么影响GIC无功损耗的因素为感 应地电场的强度和方向。

2.1 规划电网的无功损耗计算

本文以图1所示的750 kV规划电网为例,根据 接线图的线路长度信息和各变电站实际位置,估算 各座变电站的经纬度。首先计算恒定电场条件下电 网的GIC和各变电站的无功损耗情况。图1包括37 座750 kV变电站、40条750 kV交流输电线路,其中 仅有3条单回线,其余均是双回线路。





根据"Benchmark" GIC标准算例^[12]和第1节所 提的无功损耗计算方法,假设750 kV网络均采用单 相自耦变压器,规划电网中输电线路型号主要为 LGJ—400 / 50,采用我国750 kV电网的直流参数典 型值,线路单位长度的单相直流电阻取为0.012 05 Ω / km,变电站单相等效直流电阻为0.3 Ω,变电站 三相接地电阻取为0.3 Ω。由于输电线路均匀换位, 认为电网的三相参数对称,流过三相输电线路的 GIC 相等。采用电网GIC单相模型,变压器中性点 的GIC为三相绕组中的GIC之和。首先计算各个变 压器绕组和中性点的GIC,再代入式(3)计算各变电 站的无功损耗。

图 2 和图 3 分别为电网在东北方向 1 V / km 和 0.5 V / km 的均匀感应地电场中各座变电站在 GIC 作用下的无功损耗。由图可见,在整个 750 kV 的网 络中和田、且末、淖毛胡变电站的无功损耗相对较大 (以↓标出,后同),超过 110 Mvar,无功损耗最大的 是和田变,在地电场强度为 1、0.5 V / km 时,其损耗 分别为 168.4、84.2 Mvar;对比图 2、3 可看出,不改变 感应地电场的方向而仅增加电场强度,系统的无功 损耗将呈线性增长,即各变电站在1V/km电场下的 无功损耗是0.5 V/km电场下的2倍。以1V/km的 电场条件为例(图2),网络中变电站的无功损耗大 于124 Mvar的变电站数量相对较小,即网络中无功 损耗显著增大的变电站数量较少。





图4是电网在西北方向1V/km的均匀感应地 电场中各座变电站的无功损耗增量。在该电场下, 网络中乌苏、亚中、轮台、甘肃敦煌、沙洲变电站的无 功损耗增量超过140 Mvar,其中亚中变的无功损耗 增量达到了186.5 Mvar,而在东北方向相同电场强 度下无功损耗最大的和田变在该电场下仅有49.8 Mvar的无功损耗。对比图2和图4可以看出,同一 网络在相同地电场强度但不同电场方向的影响下, 各变电站无功损耗增量的分布会呈现很大的不同。





设0°为电场的正东方向,从0°至180°逆时针改 变电场方向,保持电场幅值为1V/km,每10°计算 各变电站在旋转电场下的无功损耗。图5和图6分 别给出了和田变和淮北变在各电场条件下的无功损 耗的计算结果。从图中可以看出,和田变的最大无 功损耗出现在电场方向为60°时,无功损耗为255.4 Mvar,而且在东向电场的作用下,和田变的无功损耗 较西向电场作用下明显增大。淮北变的无功损耗在 西向电场的作用下较大,最大无功损耗出现在电场 方向为120°时,对应的值为72.8 Mvar。



图 5 和田变在不同方向地电场下的无功损耗

Fig.5 Reactive power losses of Hetian substations under electric field in different directions



图 6 淮北变在不同方向地电场下的无功损耗 Fig.6 Reactive power losses of Huaibei substations under electric field in different directions

2.2 GIC 无功损耗随电场强度和方向的变化规律

总结图 2—6 可以得到 GIC 无功损耗随感应地 电场强度和方向的变化规律:

(1)对于已知的区域电网,各变压器的无功损耗 随地电场强度的增强呈线性增长,即在给定方向的 感应地电场中,任意电场强度下,网络的各座变电站 之间,无功损耗相对较大的变电站是固定的;

(2)整个网络在相同电场强度、不同电场方向的 条件下,各变压器的GIC无功损耗分布区别很大;

(3)就个体变电站而言,GIC无功损耗的大小对 地电场方向有很强的敏感性;

(4)整个区域电网在给定电场条件下,GIC无功 损耗显著增大的变电站数量较少。

3 基于GIC 无功损耗严重度指标的易受损 区域识别方法

考虑到地磁暴小概率、大范围、历史数据缺乏的 特点,仅靠一次系统的规划、投资来抵御磁暴灾害, 即通过在全网络的输电线路上串接电容,各变电站 母线并接无功补偿装置等方法,从经济和技术方面 而言不够现实。结合2.2节中所提的规律(1),弱化 感应地电场强度对GIC无功损耗分布的影响,定义 无功损耗严重度评价指标,以解决给定区域电网条件下,易受损区域(变电站)的识别问题。

3.1 GIC无功损耗严重度指标的定义

214

对电场条件*i*、变电站*j*,定义GIC无功损耗严重 度指标:

$$Q_{\text{loss_normali},j} = \frac{Q_{\text{loss},j} - \mu_i}{\sigma_i} \tag{7}$$

其中, $Q_{\text{lossi,j}}$ 为变电站j在给定电场条件i下的 GIC 无 功损耗的计算结果; $i \in I, I$ 为给定的电场环境的集 合,对每一给定电场条件进行编号,则i为正整数; μ_i 和 σ_i 分别为给定的电场条件i下,系统中所有变电站 无功损耗的平均值和样本标准差。

经过式(7)的变换,各变电站的无功损耗等效于 进行了归一化处理,在同一方向的感应地电场下,个 体变压器的无功损耗 Q_{loss}会随电场强度的增加呈线 性增加,但 GIC 无功损耗严重度指标 Q_{loss_normal}将保持 不变,即式(7)的处理方法能够消除地电场强度对 GIC 无功损耗分布的影响,且不改变各变电站之间 无功损耗的大小相对关系。

基于上述分析,集合I中的电场环境可以仅包含 感应地电场的角度,而忽略电场强度。

3.2 易受损区域的识别方法

假设由地磁扰动而产生的感应地电场的方向与 正东方向的夹角呈均匀分布。由于对称性,在电场 强度相差180°时,流经各变电站中性点和各输电线 路的GIC大小相等、方向相反,则产生无功损耗的变 压器 I_{GIC_eff} 相等,产生的无功损耗也相同,因此仅考 虑感应电场方向在0°~180° 间均匀分布。

对给定电网施加0°~180°等间隔变化的均匀电 场,在每一特定角度下,计算各变电站的无功损耗严 重度指标构成集合 Q,i为电场条件的编号。

$$Q_{i} = \{Q_{\text{loss_normal},1}, Q_{\text{loss_normal},2}, \cdots, Q_{\text{loss_normal},j}, \cdots\}$$
(8)
定义向量 Q. 为.

$$\boldsymbol{Q}_{\text{dis}} = \left\{ \boldsymbol{Q}_1, \boldsymbol{Q}_2, \cdots, \boldsymbol{Q}_n, \cdots \right\}$$
(9)

其中, Q_{ds} 为各地电场角度下,各变压器无功损耗严 重度集合 Q_i 的集合,n为正整数,理论上,变化的均 匀电场所取的角度间隔可以无穷小,则向量 Q_{ds} 的维 度可以达到无穷大。在给定电场条件下,根据无功 损耗严重度指标的定义,集合 Q_i 中的数据具有均值 为0、标准差为1的特点,而 Q_{ds} 为 $Q_i(i\in\mathbb{N}^+)$ 的集合, Q_{ds} 中的数据也具备均值为0、标准差为1的特点。 当向量 Q_{ds} 中的数据量足够大时,可认为数据服从标 准正态分布,即给定系统中各变电站的总体 GIC 无 功损耗严重度指标在不同感应地电场方向下能够服 从标准正态分布。

结合标准正态分布曲线和标准正态分布表,定 义易受损区域或易受损变电站。根据标准正态分布 表,样本值即GIC无功损耗严重度指标大于1.96的 概率为0.025,GIC无功损耗严重度指标大于1.65的 概率为0.05。结合电网的实际情况,在给定网络和 电场的条件下,计算各变电站的无功损耗严重度指 标,对网络中的变电站分类定义如表1所示。

表1 基于GIC 无功损耗严重度指标定义易受损区域

Table 1 Definition of vulnerable areas based on GIC

reactive loss severity index

$Q_{ m loss_normal}$	变电站类型
>1.96	严重受损
(1.65, 1.96]	容易受损
≤1.65	相对安全,不易受损

定义无功损耗严重度指标绝对值大于1.96的变 电站为严重受损的变电站,对系统整体而言,其物理 意义为定义了占系统中变电站总数2.5%的变电站 为严重受损区域,需要引起足够的重视,即在限制地 磁暴对电力系统造成的灾害时应首先考虑在这些变 电站的中性点串入电容或电阻,或在其低压母线并 接无功补偿装置。同理,定义了系统中另外2.5%的 变电站为容易受损类型。在大规模电网中,由阈值 1.96和1.65识别出的易受损变电站的数量将会很 多,若考虑经济和技术的限制,可以适当提高阈值, 以减少识别出来的变电站数量;对个体变电站而言, 在给定电场条件下,如果其无功损耗严重度指标绝 对值大于1.96,则认为在给定系统内,该电场条件 下,其属于严重受损的变电站类型。

4 算例分析

本节仍采用2020年750 kV规划电网进行分析。 取电场幅值为1 V / km,在0°~180°之间以逆时针方 向每1°和0.5°间隔均匀改变感应地电场的方向。计 算网络中各变电站的无功损耗严重度指标,分别构 成向量 Q_{dis_1} 和 Q_{dis_2} ,检验其分布特性如图7和图8所 示。图7(a)和图8(a)是根据向量 Q_{dis_1} 和 Q_{dis_2} 拟合 出的概率密度函数,图7(b)和图8(b)是样本数据的 Q-Q图(Quantile-Quantile plot)。

Q-Q图通常用来检验样本数据的正态性,图中 直线代表标准正态分布,样本数据与直线的拟合程 度可以直接表征样本数据的正态特性。从图7(b) 和图8(b)中可以看出,Q_{dis1}和Q_{dis2}的样本数据近似





直线,在中间段能够很好地拟合,而两端对称偏离标 准正态分布直线的厚尾特性的也表征了样本数据具 有良好的对称性。

图 7(a)显示所给样本 Q_{dis_1}更符合自由度为 6 660的t分布,而图 8(a)显示所得样本 Q_{dis_2}更符合 自由度为13 320的t分布。标准正态分布是自由度 为无穷大的t分布,对比图 7(a)和图 8(a)可知,随着 所取地电场角度间隔的减小,样本数据拟合的t分布 对应的自由度将增大,因此可以认为当感应地电场 角度的采样间隔取得无穷小时,系统各变电站在各 条件下的无功损耗严重度指标拟合的概率密度曲线 将服从标准正态分布。

若从数值上考虑,自由度为120的t分布,其概 率密度函数已经与标准正态分布相差无几,因此,在 第3节中提出的基于GIC无功损耗严重度指标的易 受损区域识别方法可用于2020年750kV规划电网。

取1 V/km的电场幅值,在0°~180°之间以逆时 针方向每1°间隔改变感应地电场的方向,统计各变 电站的 GIC 无功损耗严重度指标,对各变电站的分 类结果如图9所示。图中,T₁、T₂、T₃分别定义为"严 重受损"的次数、定义为"容易受损"的次数和定义为 "相对安全,不易受损"的次数。对应表1,在地理接 线图中对各变电站的分类如附录中的图 A1 所示。



Fig.9 Classification results of subtations

从图9中可以看出,和田、且末和布尔津变电站 各有18.3%(33次)、13.9%(25次)和10.5%(19次) 的概率被确定为严重受损的变电站,而除了这3座 变电站外,喀什、托克逊、博州、乌苏、凤凰、亚中、淳 毛湖、甘肃敦煌、甘肃沙洲变电站各有25.5%(46 次)、23.9%(43次)、14.4%(26次),22.8%(41次)、 26.7%(48次)、37.8%(68次)、18.3%(33次)、19.4% (35次)和22.8%(41次)的概率被确定为容易受损 的变电站。其余的变电站可认为是该750kV网络 中相对安全的变电站,即在任意的感应地电场强度、 角度条件下,文中指出的这些变电站易受GMD的影 响,产生更多的无功损耗,考虑磁暴条件下的电网规 划时,应优先考虑在和田、且末、布尔津变电站的 GIC抑制措施和无功补偿需求。

此外,且末、布尔津、淖毛胡、甘肃敦煌、甘肃沙 洲等变电站作为网络的终端变电站,更易受GIC电 流的影响^[16],也与现有的研究结果相符。对数据进 行进一步的分析,和田变电站主要在角度为50°~80° 的电场条件下较系统中其他变压器有更多的无功损 耗,因为与和田变电站相连的线路主要集中在50°~ 80°(230°~260°)的范围内。同理,且末变电站的严 重受害电场角度范围为0°~20°,即东西方向的电场 对且末变电站的影响较大,布尔津变电站的严重受 害电场角度在90°左右,即南北方向的电场对布尔津 变电站的危害较大。

5 结论

GIC 流过变压器中性点及绕组,引起变压器的 温升、振动、谐波等效应。其谐波效应可以由地磁暴 条件下变压器增加的无功损耗来表征。本文首先介 绍了网络中变压器无功损耗计算的数学模型,以 2020年750 kV 规划电网作为算例进行分析,变换感 应地电场的参数,计算总结了各变电站的无功损耗 随感应地电场强度和方向的变化规律。

基于上述分析,为消除感应地电场强度对GIC 无功损耗分布的影响,本文首先提出了GIC无功损 耗严重度指标,再结合感应地电场方向,提出了基于 该指标的电网磁暴易损区域识别方法。所提GIC无 功损耗严重度指标和方法可以忽略实际感应地电场 的幅值大小,对任意给定电网,可以确定网络中相对 其他变电站更易受损的变电站位置。电网规划的经 济、技术限制,应该优先考虑在识别出的变电站中性 点串接接地电阻、电容,或在变电站低压母线并接无 功补偿装置以抑制地磁暴对电力系统的影响。所提 方法可在地磁暴历史数据缺乏的情况下,为电网规 划和系统调度人员的操作提供依据。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] KAPPENMAN J. Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid[R]. [S.l.;s.n.],2010.
- [2] 刘连光,吴伟丽. 电网磁暴灾害风险影响因素研究综述[J].
 地球物理学报,2014,57(6):1709-1719.
 LIU Lianguang, WU Weili. Review of the influential factors of

the power system disaster risk due to geomagnetic storm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1709-1719.

[3] 郑宽,刘连光,BOTELER D H,等. 多电压等级电网的GIC-Benchmark 建模方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16): 179-186.

ZHENG Kuan, LIU Lianguang, BOTELER D H, et al. Modelling geomagnetically induced currents in multiple voltage levels of a power system illustrated using the GIC-Benchmark case [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):179-186.

- [4] 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[J].地球物理学报,2008,51(4):976-981.
 LIU Lianguang,LIU Chunming,ZHANG Bing,et al. Strong magnetic storm's influence on China's Guangdong Power Grid
 [J]. Chinese Journal of Geophysics,2008,51(4):976-981.
- [5] 崔峰,齐占庆,姜萌. 基于模糊神经网络的电力系统电压稳定评估[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(11):40-44.
 CUI Feng, QI Zhanqing, JIANG Meng. Fuzzy neural network based voltage stability evaluation of power systems[J]. Power System Protection and Control,2009,37(11):40-44.
- [6] 周启航,张东霞,郭强. 基于风险的电力系统暂态电压崩溃评估
 [J]. 电网技术,2011,35(8):119-123.
 ZHOU Qihang, ZHANG Dongxia, GUO Qiang. Risk based assessment on transient voltage collapse in power grid[J]. Power System Technology,2011,35(8):119-123.
- [7] 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 [C] // North American Power Symposium (NAPS). Champaign, IL, USA: IEEE, 2012:1-7.
- [8] 吴伟丽.大电网地磁暴灾害风险评估框架及指标研究[D].北 京:华北电力大学,2015.
 WU Weili. Research on the geomagnetic storm disaster risk assessment framework and system of large power grid[D]. Beijing;North China Electric Power University,2015.
- [9] SHETYE K S, OVERBYE T J. Parametric steady-state voltage stability assessment of power systems using benchmark scenarios of geomagnetic disturbances [C]//Power and Energy Conference at Illinois (PECI). Champaign, IL, USA; IEEE, 2015: 1-7.
- [10] DEMIRAY T, BECCUTI G, ANDERSSON G. Risk assessment of the impact of geomagnetic disturbances on the transmission grid in Switzerland [C] // Power and Energy Society General Meeting(PES). Vancouver, BC, Canada; IEEE, 2013; 1-5.
- [11] 刘青,韩康康,徐婷,等. 新疆2020年规划电网地磁感应电流的

分布规律及敏感性分析[J]. 电网技术,2017,41(11):3678-3684.

LIU Qing, HAN Kangkang, XU Ting, et al. Analysis of distribution regularities and sensitivity of geomagnetically induced currents in planned Xinjiang 750 kV Power Grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3678-3684.

- [12] HORTON R, BOTELER D, OVERBYE T J, et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):2368-2373.
- [13] WALLING R A, KHAN A N. Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6:1707-1714.
- [14] DONG Xuzhu, LIU Yilu, KAPPENMAN J G. Comparative analysis of exciting current harmonics and reactive power consumption from GIC saturated transformers [C] //Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, OH, USA: IEEE, 2001: 318-322.
- [15] 刘连光,钱晨,秦晓培.考虑500kV影响的特高压电网GIC-Q扰 动计算[J].中国科学:技术科学,2016,46(11):1146-1156. LIU Lianguang,QIAN Chen,QIN Xiaopei. Calculation of geomagnetically induced currents reactive power loss disturbance in China's UHV power considering the influence of 500 kV power grid[J]. Scientia Sinica Technologica,2016,46(11):1146-1156.
- [16] 郑宽.大电网地磁感应电流影响因素及建模方法研究[D].北 京:华北电力大学,2014.
 ZHENG Kuan. Study on influencing factors and modeling methods of geomagnetic induction current in power system
 [D]. Beijng:North China Electric Power University,2014.

作者简介:



徐祷旎(1994—),女,浙江宁波人,硕 士研究生,主要研究方向为地磁暴影响下 电力系统的致害机理和风险评估(E-mail: xyni530@gmail.com);

康小宁(1968—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向 为电力系统继电保护、变电站综合自动化 系统及直流输电系统控制保护(E-mail: kangxn@xjtu.edu.cn);

赵 冲(1994—), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要研究 方向为电力系统可靠性分析(E-mail: 1109490413@qq.com)。

Identification method of power system geomagnetic storm vulnerable area based on GIC reactive power loss

XU Yini, KANG Xiaoning, ZHAO Chong, GUO Mingda, LI Gengfeng

(Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The change rules of reactive power loss of substations under different geo-electric intensity and direction are analyzed and then the GIC (Geomagnetically Induced Current) reactive power loss severity index of substation is defined. The index only normalizes the actual reactive power losses and does not change the relative relationship of reactive power loss among substations. Based on the index, an identification method for the areas susceptible to geomagnetic storms in a given system is proposed, which can provide a basis for grid planning and operation under the influence of geo-magnetic storms. Finally, a planned 750kV power system is taken as an example to verify the feasibility of the proposed index and algorithm. **Key words**: geomagnetic storm; GIC reactive power loss; GIC reactive power loss severity index; probability

distribution; standard normal distribution

216







Fig.A1 Classification of substations in planned grid