

# 高压 GIS 壳体环流及损耗计算模型研究

赵义松<sup>1</sup>, 宋成伟<sup>2</sup>, 邢凯<sup>3</sup>, 刘馨然<sup>4</sup>, 王飞鸣<sup>1</sup>, 郎福成<sup>1</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 2. 辽宁省检验检测认证中心, 辽宁 沈阳 110006; 3. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110006; 4. 国网辽宁省电力有限公司营销服务中心, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:** 高压气体绝缘全封闭组合电器(GIS)壳体环流会产生很大的环流损耗,引起设备发热,长期运行将直接影响系统的输送容量和设备绝缘性能。文中为提高GIS壳体环流计算精度,简化计算程序,提高工程设计人员及现场运维人员使用效率,应用大电流母线和工程电磁场基础理论,提出空心电流互感器原理,建立GIS壳体环流等效模型。针对550 kV GIS稳态运行及短路故障工况,对不同位置壳体、短接线、接地线环流进行等效计算,给出环流及损耗分布规律。计算结果表明:550 kV GIS稳态运行时,位于进、出线端的短接线环流值大于其他位置;故障状态下故障点就近接地线上电流值最大;接地线和短接线计算电流大于实测值,主要为接地电阻分布引起。通过计算可给出GIS系统损耗总量,为GIS实际运行提供理论指导。

**关键词:** 全封闭组合电器(GIS);等效计算模型;壳体环流;运行损耗;运维反措

**中图分类号:** TM85

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)01-0201-07

## 0 引言

气体绝缘全封闭组合电器(gas insulate switch-gear, GIS)是以全封闭的形式将变压器以外的高压电器及母线设备集中在金属壳体内,内部通过0.3~0.4 MPa压强的SF<sub>6</sub>气体保持绝缘<sup>[1-4]</sup>。由于组合电器外壳体接地,通过接地网、短接线、壳体构成完整的电气回路,在电磁感应的作用下在壳体及接地网中产生循环作用的电流。运行情况表明,许多GIS/高压GIS装置的故障与其外壳上的感应电流及感应电流引起的发热现象有关<sup>[5-7]</sup>。因此,有必要对GIS的稳态等效模型进行深入研究。

GIS壳体环流大小与主母线运行电流为同一数量级,在壳体阻抗的作用下会产生很大的能量损耗,长期运行过程中会增加线路损耗,降低系统输送容量<sup>[8-11]</sup>。其次,环流损耗会导致绝缘部件发热,降低设备绝缘强度,极易引起绝缘闪络故障。因此,准确计算GIS设备环流值,给出长期运行损耗及发热位置,对降低设备故障率,提高运行可靠性具有极大现实意义。目前,国内、外计算GIS环流损耗的方法主要有等效电路算法、场路耦合算法和电磁耦合算法。等效电路算法主要是将GIS复杂的电磁感应过程通过等效电路表征,其优点是计算简便,应用广泛<sup>[12-18]</sup>,但缺少GIS系统各部分的准确等效模型,计算偏差较大。从工程应用的角度出发,变电站设计及GIS损耗计算需要更为简便

准确的数学模型及计算方法,故为计算GIS壳体环流值,须建立准确的GIS稳态运行等效电路模型。

文中应用大电流母线和工程电磁场基本原理,建立GIS系统电磁感应T型等效电路,给出GIS壳体不同位置等效阻抗的计算方法,系统分析不同计算模型的计算精度,简化计算流程。针对550 kV GIS计算得出其稳态运行及故障工况下的系统环流分布及损耗值。

## 1 等效电路计算模型

以往的GIS系统等效电路模型为等效电压源模型,即将母线与壳体间的感应电动势等效为壳体与接地网回路的等效电压源,以此计算壳体回路的电流值。由于GIS母线与壳体回路之间为磁场耦合感应产生的电流,以往的等效电路模型并不能准确表征磁路耦合过程。如何通过等效电路合理表征GIS环流磁路耦合的物理过程,是准确计算GIS环流及损耗值的关键。

GIS壳体为铝制材料,将导流母线封闭在壳体内,不仅对壳内的SF<sub>6</sub>气体起到密封作用,同时壳体产生环流后可对通流母线产生的磁场起到屏蔽作用<sup>[19-20]</sup>。因此,可以忽略GIS三相之间的磁场影响。由于母线和壳体都存在自身的阻抗,且在母线上通有稳定的电流时,母线与壳体拥有相互铰链的磁链,所以母线和壳体之间存在互阻抗,因此三相GIS中,单相内部的电路模型如图1所示。其中 $Z_k$ 为壳体等效阻抗; $Z_m$ 为母线导体阻抗; $Z_h$ 为壳体和

母线之间电磁感应产生的互阻抗;  $Z_j$  为接地线等效阻抗;  $I_m$  为母线电流。

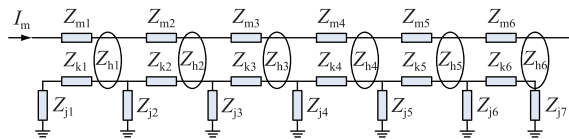


图1 GIS 单相内部的电路模型

Fig.1 GIS within the single-phase circuit model

对于单项 GIS 而言, GIS 母线通过稳定的负荷电流后,会产生稳定的磁场。GIS 壳体通过接地线、接地网构成完整的电气回路,形成稳定的磁通  $\Phi$ , 感应产生稳定的环流,如图 2 所示。在母线通流产生的磁场作用下, GIS 壳体回路通过。可以将 GIS 电磁感应模型看作是空气芯的电流互感器, 母线 M 为原边, 壳体回路为副边。可以看出, 对于 GIS 来说, 高压载流导体与环路间的互感即是电流互感器的激磁电感, 由此形成互感器的激磁电抗。由于没有铁芯, 所以没有激磁电阻。与一般互感器不同的是该电流互感器副边成短路状态, 没有负荷阻抗, 所以可以根据电流互感器等值电路的原理和二端口网络原理将电路模型简化<sup>[9,20]</sup>, 如图 3 所示。

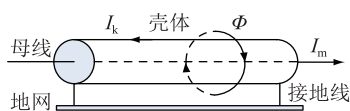


图2 GIS 环流示意

Fig.2 Schematic diagram of GIS circulation

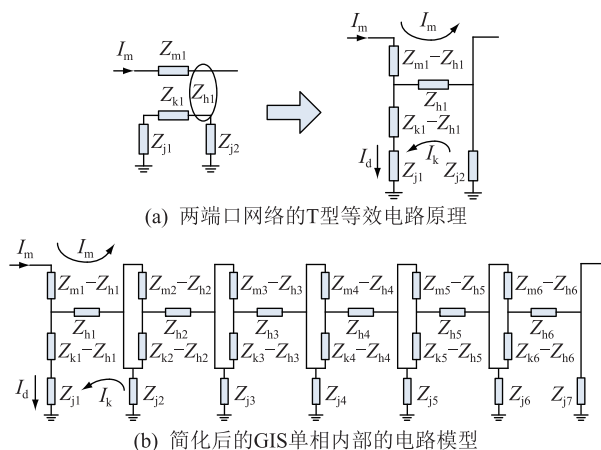


图3 等效电路化简示意

Fig.3 Simplification of the equivalent circuit diagram

其中,  $I_d$  为入地电流;  $I_k$  为壳体电流。由图 3(a) 可知, 经过电路的转换, 可将 GIS 的电路模型等效为 T 型等效电路。根据电路理论中的二端口网络原理, 当已知母线电流  $I_m$  时, 可以求出壳体电流  $I_k$ 。将图 3(a) 中的等效电路依次串联起来可以得到 GIS 单相内部的电路模型, 如图 3(b) 所示。应用电路仿

真软件 EMTP 可以求出 GIS 内每 2 根接地线之间壳体上的电流  $I_k$  和每根接地线上的入地电流  $I_d$ 。壳体感应电压  $U_k$  为壳体环流  $I_k$  与壳体阻抗  $Z_k$  的乘积。

三相 GIS 的环流产生原理与单相 GIS 相同, 但是感应电流环流回路不同。当三相设备端部接有短接板时, 环流主要在壳体与短接板构成的回路中流动, 而入地电流则会相应减小。三相环流现象和单相环流的主要不同处在于, 单相纵向地网电阻发热, 而三相电流有效值相等时会只在外壳的端部地网发热, 纵向地网电阻并不发热<sup>[21-22]</sup>。

## 2 母线与壳体间互阻抗的计算

由于母线的封闭作用和隔离作用, 在计算 GIS 壳体和母线相关参数时, 可以不考虑母线间的临近效应, 只考虑单相 GIS 内母线和壳体间的电磁关系。由于母线阻抗、壳体阻抗、短接线与接地线阻抗计算模型可以通过文献[3-7]给出, 文中不再重复阐述, 重点给出三相母线与壳体间互阻抗计算模型。

当 GIS 壳体为三相全连式时, 三相壳体被短接排所连接, 此时不能只考虑单相母线上所产生的磁场对壳体、接地线和地网所构成回路的影响, 应计算三相母线所产生的磁场对回路的影响, 如图 4 所示。图中  $B_a, B_b$  和  $B_c$  分别为三相母线在回路内产生磁场的磁感应强度。通过工程电磁场的相关原理可以分别求出 A 相回路内的磁通  $\psi_{AA}, \psi_{AB}$  和  $\psi_{AC}$ , 即可以分别求出 A 相壳体与三相母线的互感, 如式 (1)、式(2)所示。

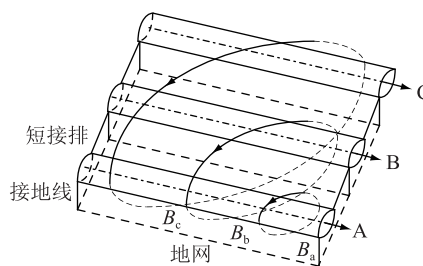


图4 三相母线所产生的磁场对 A 相回路的影响

Fig.4 The diagram of circuit of A the phase magnetic field generated by three-phase bus

$$\psi_{AB} = \int_0^l \int_{\sqrt{r^2+s_1^2}}^{\sqrt{(r+h)^2+s_1^2}} B_B d\rho dy = \int_0^l \int_{\sqrt{r^2+s_1^2}}^{\sqrt{(r+h)^2+s_1^2}} \frac{\mu_0 I_B}{2\pi\rho} d\rho dy = \frac{\mu_0 I_B l}{4\pi} \ln \frac{(r+h)^2 + s_1^2}{r^2 + s_1^2} \quad (1)$$

由式(1), 则有:

$$M_{AB} = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \ln \frac{(r+h)^2 + s_1^2}{r^2 + s_1^2} \quad (2)$$

同理可以求出  $M_{AA}$  和  $M_{AC}$  为:

$$\begin{cases} M_{AA} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r+h}{r} \\ M_{AC} = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \ln \frac{(r+h)^2 + s_2^2}{r^2 + s_2^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $M_{AA}, M_{AB}, M_{AC}$  分别为 A 相壳体与 A、B、C 三相母线的互感;  $B_B$  为 B 相母线在回路内产生磁场的电感应强度;  $\mu_0$  为母体导线的磁导率;  $I_B$  为 B 相母线电流;  $\rho$  为柱坐标半径变量;  $l$  为壳体的长度;  $h$  为壳体的高度;  $r$  为壳体的半径;  $s_1$  为相邻两相壳体间的距离;  $s_2$  为不相邻两相壳体间的距离。由于 A 相壳体和 C 相壳体为对称结构, 所以 C 相壳体与三相母线间的互感可以由 A 相的计算公式对应求得。

当求 B 相壳体与三相母线的互感时, 也可通过式(2)来求得。因为 B 相壳体位于三相壳体的中间, 所以 B 相与 A 相间的互感和 B 相与 C 相间的互感相等, 即:

$$\begin{cases} M_{BB} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r+h}{r} \\ M_{BA} = M_{BC} = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \ln \frac{(r+h)^2 + s_1^2}{r^2 + s_1^2} \end{cases} \quad (4)$$

综上所述, 三相母线与三相壳体间的互感分别为:

$$\begin{cases} M_A = M_C = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \ln \frac{[(r+h)^2 + s_1^2](r+h)^2[(r+h)^2 + s_2^2]}{(r^2 + s_1^2)(r^2 + s_2^2)r^2} \\ M_B = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{[(r+h)^2 + s_1^2](r+h)}{(r^2 + s_1^2)r} \end{cases} \quad (5)$$

### 3 GIS 壳体环流及损耗计算

针对我国某 550 kV GIS, 有关结构参数如下: 额定电流  $I_m = 4$  kA; 母线半径  $R_m = 0.08$  m; 壳体平均半径  $R_k = 0.6$  m; 壳体厚度  $C = 0.008$  m; 壳体的对地高度  $H = 8$  m; 母线和壳体的长度  $L_{12} = 20$  m,  $L_{23} = 24$  m,  $L_{34} = 24$  m,  $L_{45} = 30$  m,  $L_{56} = 36$  m; 相邻两相壳体间的距离  $s_1 = 1.5$  m, 不相邻两相壳体间的距离  $s_2 = 3$  m。工程要求每隔一定距离, 在外壳上要设置短接排, 同时在该处进行接地。设置短接排的目的是, 当 GIS 稳态运行时, 外壳上所感应的环流沿着短接排所形成的磁场可以和母线上电流所形成的磁场相抵消, 从而减少温升和损耗, 提高运行效率。接地线的设置是当变电站正常运行时, 提供参考地电位; 当站内发生短路时, 为短路电流提供最短的路

径, 使其有效导入大地。

图 5 为 550 kV 变电站 GIS 布置图。图中 TM1, TM2 为 GIS 电源进线位置; OUT1 为 GIS 出线位置; CB11、CB12、CB13 为断路器位置; 1, 2, 3, 4, 5, 6 为短接线位置; 黑粗线为短接排, 短接排的型号为 Al60 mm×10 mm。在每处短接排的每一相设置一条接地线, 其型号为 Cu40 mm×5 mm。GIS 壳体磁导率为  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m; SF<sub>6</sub> 气体的介电常数为 1.000 29 F/m。电阻率如表 1 所示。

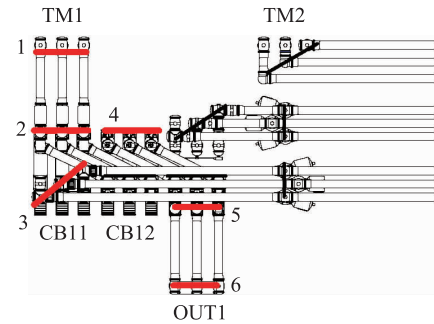


图 5 550 kV 变电站 GIS 布置  
Fig.5 550 kV substation GIS layout

表 1 不同位置的电阻率  
Table 1 The resistivity of the table at different positions  $\Omega \cdot m$

位置	电阻率	位置	电阻率
母线	$1.74 \times 10^{-8}$	短接排	$2.95 \times 10^{-8}$
壳体	$2.95 \times 10^{-8}$	接地线	$1.74 \times 10^{-8}$

#### 3.1 GIS 稳态运行工况下环流计算

文中以单机单线出的工作方式为例, 当 GIS 正常运行时, 母线中的电流为 4 kA, 此时接地线上的电流、短接排上的电流和壳体上的电流如表 2—表 4 所示。

表 2 接地线上电流稳态值  
Table 2 Steady state value of current on ground line kA

壳体位置序号	电流值		
	A 相	B 相	C 相
1	0.974	0.800	0.955
2	0.650	0.103	0.650
3	1.171	0.206	1.173
4	1.175	0.207	1.173
5	0.878	0.145	0.866
6	1.185	0.842	1.176

通过以上数据可以明显看出壳体上的电流值表现出 B 相大, A、C 两相小的趋势, 且 A、C 两相的幅值大体相当。但接地线上的电流值却表现出 A、C 两相大, B 相小的趋势, A、C 两相的幅值也大体相

当。每一点处的 2 个短接排上的电流相值差不大,但 1 点和 6 点处的短接排电流值要明显大于中间各点处的电流值。

表 3 短接排上电流稳态值  
Table 3 Current steady state value on short circuit kA

壳体位置序号	电流值	
	A 相—B 相	B 相—C 相
1	2.204	2.145
2	0.978	0.973
3	1.777	1.755
4	1.777	1.764
5	1.322	1.305
6	2.474	2.44

表 4 壳体上的电流稳态值  
Table 4 Current steady state value on the case kA

壳体段区间	电流值		
	A 相	B 相	C 相
1—2	3.096	4.316	2.986
2—3	2.174	3.76	1.763
3—4	4.202	4.87	4.223
4—5	2.16	3.762	1.763
5—6	3.564	4.543	3.52

由于 GIS 壳体体积大,很难通过罗氏线圈或电流互感器测量电流。因此,采用 FLUKE i6000sFlex AC 便携式交流电流测量罗氏线圈对 GIS 进线端和出线端的短接线及接地线电流进行测量,测量结果见表 5。

表 5 接地线和短接线上电流测量值  
Table 5 Measurement of current on ground wires and short wires kA

壳体位置序号	接地线电流测量值			短接线电流测量值	
	A 相	B 相	C 相	A 相—B 相	B 相—C 相
进线端 1	0.996	0.842	1.062	2.312	2.267
出线端 6	1.230	0.937	1.281	2.589	2.594

通过比较计算值与测量值可以看出:测量值整体大于计算值,接地线最大偏差为 11.28%,位于出线端 B 相位置;短接线最大偏差为 6.3%,位于出线端 B 相—C 相位置。计算值与实测值出现偏差的主要原因是变电站不同位置接地电阻不同。文中 GIS 壳体环流计算模型并未考虑接地网电阻变化对壳体环流的影响。变电站接地电阻一般为 0.1~1 Ω,根据接地网的结构和材质,不同位置接地电阻存在差异。文中计算模型统一设定变电站接地电阻为 0.5 Ω,并未有效表征接地电阻的变化分布,导致接

地线和短接线电流计算值比实测值偏小。因此,计算 GIS 壳体环流时,建议考虑接地网分布及接地电阻变化对环流值的影响。

### 3.2 短路故障工况环流计算

如图 5 所示,当单机单线出操作方式中 B 相 6 点处发生单相接地短路时,即出线套管处发生短路,假设短路电流为 63 kA,非故障相电流为 4 kA,接地线、短接排和壳体上的电流值如表 6—表 8 所示。

表 6 接地线上的短路电流值  
Table 6 Short-circuit current value on the ground kA

壳体位置序号	电流值		
	A 相	B 相	C 相
1	1.754	1.036	1.703
2	0.663	0.027	0.648
3	0.661	0.027	0.648
4	1.222	0.188	1.213
5	1.339	0.765	1.364
6	16.609	26.301	16.489

表 7 短接排上的短路电流值  
Table 7 Short-circuit current value on the ground kA

壳体位置序号	电流值	
	A 相—B 相	B 相—C 相
1	1.468	1.430
2	0.961	0.970
3	1.729	1.724
4	1.731	1.693
5	2.317	2.425
6	14.273	14.416

表 8 壳体上的短路电流值  
Table 8 Short-circuit current value on the case kA

壳体段区间	电流值		
	A 相	B 相	C 相
1—2	3.100	0.298	3.010
2—3	2.177	0.088	1.764
3—4	4.217	0.162	4.213
4—5	2.176	1.177	1.762
5—6	3.564	8.128	3.524

通过以上数据可以得知,接地线上最大电流值为 26.301 kA,发生在离短路处最近的接地线上,即 6 点 B 相处的接地线。短接排流过的最大电流值为 6 点处 B 相—C 相,最大值为 14.416 kA。

### 3.3 GIS 壳体损耗计算

GIS 外壳中一般有环流损耗和涡流损耗。但当

外壳回路漏感抗很小时,涡流损耗可忽略不计,此时只有环流损耗。一般情况下,环流损耗计算为:

$$P_c = I_k^2 r K_f \quad (6)$$

式中:  $I_k$  为外壳环流(有效值);  $r$  为外壳电阻;  $K_f$  为外壳的集肤效应系数,在厚度不大于 8 mm 时可取为 1,根据 GIS 壳体、短接线及接地线实际尺寸,文中忽略集肤效应对损耗值的影响。计算得到稳态运行态下壳体、接地线、短接线的损耗功率如表 9—表 11 所示。

表 9 壳体稳态运行损耗值

Table 9 Casing steady-state operating loss

壳体段 区间	稳态损耗值/W			单位长度平均 损耗( $W \cdot m^{-1}$ )
	A 相	B 相	C 相	
1—2	996.8	1 937.3	927.3	62.5
2—3	589.8	1 680.9	387.9	34.2
3—4	2 203.6	2 959.8	2 225.6	102.1
4—5	727.8	2 335.2	484.9	34.1
5—6	2 377.8	3 863.6	2 319.5	78.1

表 10 短接排稳态运行损耗值

Table 10 Steady-state operating loss of short circuit W

壳体位 置序号	稳态运行损耗值	
	A 相—B 相	B 相—C 相
1	134.3	127.2
2	26.4	26.2
3	87.3	85.2
4	87.3	86.0
5	48.3	47.1
6	169.2	164.6

表 11 接地线稳态运行损耗值

Table 11 Steady state operating loss of ground line W

壳体位 置序号	稳态运行损耗值		
	A 相	B 相	C 相
1	660.3	445.4	634.8
2	294.1	7.4	294.1
3	954.4	29.5	957.6
4	960.9	29.8	957.6
5	536.5	14.6	522.0
6	977.3	493.4	962.6

通过计算可以看出,550 kV GIS 单机单线出稳态运行方式下,壳体损耗总量为 26 kW,平均年耗电量为 224 640 kW·h;短接线损耗总量为 1.089 kW,平均年耗电量为 9 540 kW·h;接地线损耗总量为 9.732 kW,平均年耗电量为 85 252 kW·h;GIS 系统损耗总量为 36.821 kW,平均年耗电量为

322 552 kW·h。应用文中壳体环流及损耗计算模型可以准确地给出变电站 GIS 不同负荷运行及故障情况下的损耗值,为输变电系统线损预估、降损提升、运维反措提供理论指导和技术支撑。

## 4 结语

文中应用空心电流互感器原理建立 GIS 壳体环流等效模型,在理论上计算 550 kV 变电站 GIS 稳态运行及故障工况下的壳体环流及运行损耗值,给出了 GIS 系统壳体环流及损耗的分布规律,可用于指导实际工程线损预估及运维反措。

通过 550 kV GIS 稳态运行及故障状态下不同位置环流值计算可以看出:稳态运行时增加短接线是降低壳体环流值的有效方法,短接线环流最大值出现在 GIS 进、出线端。故障状态下环流最大值出现在故障点附近,接地线电流要明显大于短接线及壳体电流值。通过比较接地线及短接线电流计算值与实测值,最大计算偏差为 11.28%,主要为接地电阻分布不均引起。GIS 系统损耗值取决于壳体、接地线、短接线的环流值和电阻,单机单线出运行下,GIS 系统损耗总量为 36.821 kW,平均年耗电量为 322 552 kW·h。可以看出,降低 GIS 环流是增大输电容量,降低输电损耗和减少设备运行发热的有效方法。

## 参考文献:

- [1] 王娜娜,刘晓瑞,王刚,等.1 000 kV GIS 布置关键问题探讨[J]. 智慧电力,2019,47(1):1-5,12.  
WANG Nana, LIU Xiaorui, WANG Gang, et al. Discussion on key issues of 1 000 kV GIS layout[J]. Smart Power, 2019, 47(1):1-5,12.
- [2] 马波,吴旭涛,李秀广,等.基于振动信号的 GIS 隔离开关接触状态带电检测技术研究[J]. 智慧电力,2019,47(12):73-77.  
MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Contact status live detection of GIS disconnector based on vibration signal[J]. Smart Power, 2019, 47(12):73-77.
- [3] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002:7-10.  
LIN Xin. Modern high-voltage electrical technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002:7-10.
- [4] 黎斌. 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003:109-111.  
LI Bin. Design of high-voltage electrical appliances[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003:109-111.
- [5] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计[M]. 1 版. 北京:水利电力出版社,1985:160-185.  
WU Lijian. Theoretical basis and design of high current bus[M]. 1st ed. Beijing: Water Resources and Electric Power

- Press, 1985: 160-185.
- [6] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 1版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 159-166.  
NI Guangzheng. Principles of engineering electromagnetic fields [M]. 1st ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 159-166.
- [7] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2007: 235-257.  
HE Jinliang, ZENG Rong. Grounding technology of power system [M]. 1st ed. Beijing: Science Press, 2007: 235-257.
- [8] 寇晓适, 张科, 张嵩阳, 等. 大型变电站接地网导通状况研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 88-92.  
KOU Xiaoshi, ZHANG Ke, ZHANG Songyang, et al. Study on grounding grid connective resistance of large-scale substation [J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 88-92.
- [9] 徐国政, 关永刚. GIS和GIL外壳环流及损耗的简化分析和估算[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 247-249.  
XU Guozheng, GUAN Yonggang. Simplified analysis and calculation on circulating current and power loss in enclosure of GIS and GIL [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 247-249.
- [10] 庞亚东, 倪敏. 1 000 kV GIS(HGIS)接地设计方案[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 49-52.  
PANG Yadong, NI Min. Study on 1 000 kV GIS (HGIS) grounding design [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 49-52.
- [11] 张文亮, 张国兵. 特高压交流试验电源特点探讨及比较[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 3-6.  
ZHANG Wenliang, ZHANG Guobing. Discussion and comparison of characteristics of AC-testing supply used for UHVAC [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 3-6.
- [12] 张亚婷, 高博, 贾磊, 等. 800 kV分体结构GIS母线外壳环流特性的研究[J]. 电磁避雷器, 2008, 226(6): 31-35.  
ZHANG Yating, GAO Bo, JIA Lei, et al. Characteristics of the circulating current on 800 kV insulated phase bus enclosure [J]. Insulators and Surge Arresters, 2008, 226(6): 31-35.
- [13] 孙为民. 非均匀土壤中发变电所接地系统优化设计研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.  
SUN Weimin. Research on optimal design of grounding system of power generation and substation in heterogeneous soil [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [14] 王飞鸣, 张彬, 田勇, 等. 基于场路耦合方法的特高压开关站接地系统环流计算分析[J]. 东北电力技术, 2017, 38(9): 17-22.  
WANG Feiming, ZHANG Bin, TIAN Yong, et al. Circulation calculation analysis of grounding system in UHV switch station based on field-circuit coupling method [J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(9): 17-22.
- [15] 施围, 张亚婷, 吕鸿. GIS母线外壳环流与暂态地电位升高现象的研究[J]. 特高专递, 2007, 36(1): 11-14.  
SHI Wei, ZHANG Yating, LYU Hong, et al. The study of GIS bus enclosure circulation and transient phenomena of ground potential rise [J]. Special Contribution, 2007, 36(1): 11-14.
- [16] ZOU J, ZENG R, HE J L, et al. Numerical Green's function of a point current source in horizontal multi-layer soils by utilizing the vector matrix pencil technique [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 730-733.
- [17] 康宁, 邹建华, 杨兰均, 等. 三相同壳结构GIS快速暂态过程模型构建和参数计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 112-117.  
KANG Ning, ZHOU Jianhua, YANG Lanjun, et al. Transient parameters and numerical calculation model on VFT in three-phase enclosed GIS [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 112-117.
- [18] Working Group 33/109. Very fast transient phenomena associated with gas insulated substation [R]. Paris: CIGRE Report 33-13, 1988.
- [19] TEGOPOULOS J A, KRIEZIS E E. Eddy current distribution in cylindrical shells of infinite length due to axial currents, part I: shells of one boundary [J]. IEEE PAS-90, 1971, 90(3): 1278-1286.
- [20] 王飞鸣, 林莘, 徐建源. 特高压气体绝缘开关设备接地系统环流计算与分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 33-37.  
WANG Feiming, LIN Xin, XU Jianyuan. Calculation and analysis of circulation of grounding system for UHV gas insulated switchgear [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 33-37.
- [21] SMEETS R P P. Disconnecter switching in GIS three-phase testing and phenomena [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 122-127.
- [22] BROWN G W, ROCAMORA R G. Surge propagation in three-phase pipe-type cables, part I: unsaturated pipe [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 89-95.

作者简介:



赵义松

赵义松(1966),男,硕士,高级工程师,从事电力系统暂态计算,高压电器试验技术,输变电设备状态监测技术相关工作(E-mail: 13889206178@163.com);

宋成伟(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力设备检测技术,电力系统暂态分析技术,高压电器试验技术相关工作;

邢凯(1976),男,硕士,高级工程师,从事电力设备在线监测技术,电力系统接地技术相关工作。

## Circulation and loss calculation model of high voltage GIS shell

ZHAO Yisong<sup>1</sup>, SONG Chengwei<sup>2</sup>, XING Kai<sup>3</sup>, LIU Xinran<sup>4</sup>, WANG Feiming<sup>1</sup>, LANG Fucheng<sup>1</sup>

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Shenyang 110006, China;

2. Testing and Certification Center of Liaoning Provincial Inspection, Shenyang 110006, China;

3. Shenyang Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;

4. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Shenyang 110006, China)

**Abstract:** High-voltage gas insulate switchgear (GIS) shell circulation is the main cause of operating losses in substations. Circulation can cause the device to heat up. If the substation is operated for a long time, the transmission capacity of the power system and the insulation performance of the equipment will be seriously affected. The purpose of this article is to simplify the loss calculation procedure and improve the calculation accuracy of GIS shell circulation and the efficiency of engineering designers and on-site operation and maintenance. The basic theory of high current bus and engineering electromagnetic field is applied. Based on the principle of hollow current transformers, an equivalent model of GIS shell circulation is established. For steady-state operation of 550 kV GIS and short-circuit fault conditions, circulating currents of shells, short wiring, and grounding wires at different locations are calculated. The circulation and loss distribution rules are given. The calculation results show that when the 550 kV GIS is in steady-state operation, the short-circuit circulating current value at the inlet and outlet ends is greater than other locations; the current value at the fault point near the ground wire is the largest in the fault state; the calculated current of the ground wire and the short wire is greater than the measured value, mainly it is caused by the distribution of grounding resistance. The total loss of GIS system is given through calculation, which gives theoretical guidance for the actual operation of GIS.

**Keywords:** gas insulate switchgear (GIS); equivalent calculation model; shell circulation; operation loss; operation maintenance and anti-fault measures

(编辑 方晶)

(上接第 200 页)

## Thermal runaway characteristic of lithium iron phosphate battery modules through overcharge and the fire extinguishing effect of water mist

ZHAO Lantian<sup>1</sup>, JIN Yang<sup>1</sup>, ZHAO Zhixing<sup>1</sup>, SUN Lei<sup>2</sup>, GUO Dongliang<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. Research Center of Grid Energy Storage and Battery Application School of

Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Thermal runaway and fire extinguishing are both urgent problems in large-scale applications of lithium iron phosphate battery (LFP) modules. In this paper, the thermal runaway characteristic of a single LFP module and a cluster of LFP modules are studied under constant current overcharge mode. Water mist is used as a fire extinguishing agent to study its fire extinguishing effect on single and cluster LFP modules. The experimental results show that the temperatures of the modules in the cluster rise sharply after combustion, with a temperature rise rate of 42.74 °C/s in the first 18 s. The peak temperature is nearly 1 000 °C, which is significantly higher than that of the peak temperature of the single module (600 °C). After 100 seconds of continuous spraying of water mist, the temperatures of all the modules drop rapidly, and the fires are completely extinguished without reignition, thus proving that the fire extinguishing effects by using water mist are satisfactory. Above results provide an effective theoretical and experimental support for the safety and fire extinguishing of the LFP-based energy storage power station.

**Keywords:** lithium iron phosphate battery; water mist; overcharge; thermal runaway; fire extinguishing

(编辑 方晶)