

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.012

66 kV 系统消弧线圈分散式补偿策略研究

李冠华¹, 徐 凯², 栗 罡², 鲁旭臣¹, 赵振威¹, 李 爽¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110006)

摘要: 为保证 66 kV 谐振接地系统安全运行, 需合理配置消弧线圈的阻尼电阻和脱谐度两个参数, 然而分散式补偿运行使得参数设置变得困难。文中提出一种分散式补偿策略, 该策略考虑残流、故障相电压恢复速度、故障后零序电压衰减残值以及位移度等核心指标, 并通过实验的方式得到故障残流应小于 7 A, 故障相电压恢复速度应低于 500 V/ms。在此基础上提出参数优化约束方程, 利用梯度下降法获取脱谐度极大值及阻尼电阻的极小值参数。最后利用一实际 66 kV 谐振接地系统作为算例, 仿真验证了所提补偿策略的有效性。

关键词: 66 kV 谐振接地系统; 脱谐度; 阻尼电阻; 参数校核

Research on Distributed Compensation Strategy of Arc Suppression Coil of 66 kV System

LI Guanhua¹, XU Kai², LI Gang², LU Xuchen¹, ZHAO Zhenwei¹, LI Shuang¹

(1. State Grid Liaoning Electrical Power Research Institute, Shenyang 110006, China; 2. State Grid Liaoning Electrical Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: For assuring safe operation of 66 kV resonant grounding system, such two parameters as the damping resistance and the detuning degree of the arc suppression coil need to be reasonably configured. However, the distributed compensation operation makes the parameter setting difficult. In this paper, a kind of decentralized compensation strategy is proposed, which considers such core data as residual current, recovery speed of faulty phase voltage, residual value of the zero-sequence voltage decay after the fault, and the displacement degree. It is obtained by way of experiment that the faulty residual current shall be less than 7 A and the recovery speed of faulty phase voltage shall be lower than 500 V/ms. On this basis, the parameter optimization constraint equation is proposed, and the gradient descent method is used to obtain the maximum value of detuning degree and the minimum value parameters of damping resistance. Finally, an actual 66 kV resonant grounding system is used as an example to verify the effectiveness of the proposed compensation strategy by simulation.

Key words: 66 kV resonance grounding system; detuning degree; damping resistor; parameters adjust

0 引言

合理选择电力系统中性点接地方式是防止系统事故的综合技术问题, 具有理论与实践经验紧密关联的特点^[1-7]。中性点经消弧线圈接地系统, 称为谐振接地系统, 谐振接地的原理是研究消弧线圈的基础理论, 其由电压谐振原理与电流谐振原理两部分组成, 当系统正常运行时, 消弧线圈与三相对地电容在系统不平衡电压作用下, 构成电压谐振回路, 合理的利用电压谐振原理可指导补偿电网的

正常运行; 当系统发生故障时, 利用消弧线圈对系统电容电流进行补偿, 达到灭弧的目的, 符合电流谐振原理^[8-11]。若补偿效果差, 则导线在接地时可能引发山火, 或跨步电压造成人员动物伤亡^[12-14]。

东北及蒙东地区 66 kV 电网系统中性点大多通过消弧线圈接地, 以实现补偿系统电容电流, 降低弧光接地过电压事故发生的概率^[15]。但 66 kV 谐振接地系统不同于 10 kV 系统, 其网架主要由架空线路构成, 线路非有效换位造成的系统正常运行时三相电压不平衡较 10 kV 系统严重, 需要消弧线圈配

收稿日期: 2024-09-18; 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(2022YF-80)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(2022YF-80).

置的阻尼电阻提供足够的阻尼率,对不平衡电压进行限制,以保证系统的安全运行^[16]。严重时不对称电压可达 $0.035U_{ph}$ (不对称度为3.5%)。长期作用于系统中性点的位移电压过高是十分危险的,只有通过增加脱谐度或阻尼率来实现,二者是相互耦合的关系。目前行业标准DL/T 1057—2007《自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件》中要求,阻尼电阻应使系统正常运行时位移电压不高于相电压的15%,而在实际运行中,一般要限制位移电压在5%以内^[17]。由于220 kV变压器绕组联结组别的限制(有Y/Y/Δ和Y/Δ两种),只能在不同66 kV站通过多台消弧线圈进行分散补偿,这进一步降低了系统阻尼率,使运行位移电压可能长期处在超标状态^[18-22]。考虑到目前多台消弧线圈并列运行后导致消弧线圈无法准确自动跟踪系统电容电流,所以消弧线圈均运行在手动调谐状态,66 kV消弧线圈的运行管理一般由供电公司调度部门负责,而应如何具体设置合理的脱谐度,目前各标准对脱谐度的设定范围说法不一^[23-24]。为避免谐振,所以脱谐度往往设置偏大,调度通常根据目前国家电网公司《消弧线圈运行规范》中脱谐度 ν 取值范围为5%~20%,部分地方电网运规要求在5%~15%之间,过大的脱谐度导致持续性的接地电弧不能自行熄灭、接地电弧反复重燃产生间歇性弧光过电压,引发系统短路故障、火灾等扩大化事故的发生^[25-28]。

系统脱谐度、位移度、阻尼率等参数存在复杂的相互制约关系,若消弧线圈的数量、阻尼电阻选择不合理,脱谐度设置不正确,会使得消弧线圈的补偿作用大大降低。为避免此问题,相关学者对其展开的相关研究主要分为:①优化消弧线圈对系统电容电流的测量方法^[26,29-30];②分析分布式补偿的消弧线圈设备对系统的运行影响和成本核算^[7,19,31];③分析消弧线圈的参数设置合理性,文[10]提出应控制系统残流不超过10 A,中性点位移电压不超过15%相电压;文[28]定性的研究了阻尼电阻和脱谐度对三相不平衡电压、残流等的影响。但目前的研究工作均为经验性的定性研究,并未提出更合理的实证依据。

文中分析66 kV谐振接地系统运行原理,总结谐振接地系统运行中存在的主要技术问题,提出考虑脱谐度和位移电压偏移的消弧线圈参数优化策略,通过现场实测数据给定残流、故障相电压恢复速度、故障后零序电压衰减残值等约束依据,提出基于梯度下降法的消弧线圈参数优化方法,通过仿真分析,验证该优化方法能够较好的提升谐振接地

系统运行安全性。

1 分散式补偿策略数学模型

谐振接地系统区别于其他系统的两个重要参数是阻尼率和脱谐度,其影响着系统正常运行时的中性点位移电压,系统发生单相接地故障时的接地残流大小以及间歇性电弧的恢复电压上升速度以及故障恢复后的零序电压衰减速度。合理设置消弧线圈的阻尼率以及脱谐度是保证系统稳定安全运行的重要措施,而分布式运行的消弧线圈进一步加大了合理配置系统脱谐度和阻尼率的难度。

1.1 阻尼电阻与位移电压的关系分析

一个典型的分布式补偿的66 kV谐振接地配电系统见图1,其有 n 条馈线组成,每条馈线的长度不同,可能是架空线或电缆线路,这导致每条馈线的参数不同,消弧线圈可以连接在线路末端66 kV变压器的中性点上。

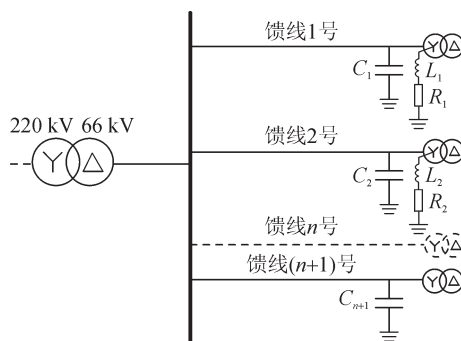


图1 66 kV配电网典型单相接地故障示意图

Fig. 1 Typical single-phase ground fault circuit for 66 kV distribution network

正常运行时的等值接线见图2。三相对地电容电流经大地与消弧线圈组成回路,根据基尔霍夫定律则有

$$I_A + I_B + I_C = -I_L \quad (1)$$

式(1)中, I_A 、 I_B 、 I_C 分别为三相等效对地电流。

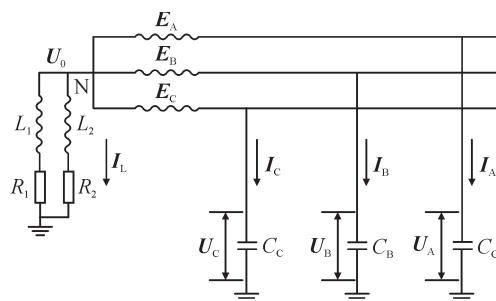


图2 谐振接地电网等值接线图

Fig. 2 Equivalent wiring diagram of resonant grounding grid

假设三相电源电势对称,电气设备三相绝缘条件大致相同, U_A 、 U_B 、 U_C 分别为三相对地电压。

存在 $U_A = E_A + U_0$, $U_B = E_B + U_0$, $U_C = E_C + U_0$, $E_B = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})E_A$, $E_C = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})E_A$ 等关系。

根据 $I_A = U_A \cdot j\omega C_A$ 以及 $I_L = \frac{U_0}{j\omega L + R}$, 设 $C_0 = C_A + C_B + C_C$ 可得到

$$U_0 = -\frac{E_A \cdot j\omega C_A + E_B \cdot j\omega C_B + E_C \cdot j\omega C_C}{j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L_1 + R_1} + \frac{1}{j\omega L_2 + R_2}} \quad (2)$$

文中系统电容电流为 $I_C = U_{ph} \cdot j\omega C_0$, 补偿电流 $I_L = U_{ph} \cdot (\frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{j\omega L_2})$ 。

从式(2)可以看出, 补偿电网的位移电压 U_0 与补偿消弧线圈的补偿深度即脱谐度和阻尼电阻有关。

1.2 脱谐度与残流关系分析

系统的脱谐度 $v = (I_C - I_L)/I_C$, 脱谐度影响系统发生单相接地故障后的故障残流, 当系统运行方式确定后, 脱谐度越大, 接地残流也越大, 而接地残流的大小是影响接地电弧过零后自行熄灭的重要因素。残流的电动力和热效应对故障点弧道具有破坏作用, 残流越大, 这种破坏度越剧烈或电离越充分, 介质绝缘强度越不易恢复, 导致电弧越不易熄灭。所以控制脱谐度的目标之一是通过脱谐度来控制残流的大小。目前 GB 50064—2014 对残流的要求一般不超过 10 A, 但试验数据为 10 kV 系统中获得, 对于 66 kV 系统电压更高, 故不能简单套用标准。

1.3 脱谐度与故障相电压关系分析

接地电弧过零熄灭后是否重燃, 另一项重要的指标是故障相的恢复电压。故障后消弧线圈的阻尼电阻退出运行, 两个消弧线圈可以等效成单消弧线圈进行分析, 此时补偿电网等值回路见图 3。图 3 中: C_{1-3} 为谐振接地系统不同馈线对地电容, 其中假设 C_1 馈线为故障馈线, R_{01-03} 为各馈线的等效电阻, i_{C1-C3} 为各馈线的电容电流; L 为消弧线圈的等值电感; $E = U_{phm} \sin(\omega t + \varphi)$ 为系统发生单相接地的故障相电源电势; U_{phm} 为系统相电压最大值; ω_0 为系统工频角频率; φ 为故障发生时刻的瞬时相位; U_{bd} 为系统的三相不平衡电压; R 为单相接地故障过渡电阻; U_0 为系统的中性点电压。在单相接地电弧存在期间, 电路中开关 K 相当于闭合状态, 电流过零电弧熄灭相当于开关 K 突然开断, 触头两端的电压相当于故障相的恢复电压 $u_r(t)$ 。

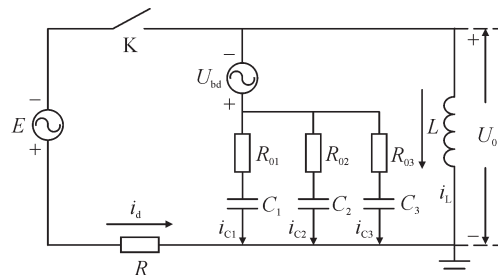


图3 补偿电网等值回路

Fig. 3 Compensation grid equivalence circuit

求解开关 K 断开后电路过渡过程, 故障相的恢复电压 u_r 可写为

$$u_r(t) = U_{phm} [e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-\delta t} e^{j(\omega_0 t + \varphi)}] \quad (3)$$

式(3)中: ω_0 系统中性点自由振荡电压角频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3CL}}$; δ 为系统中性点电压阻尼系数,

$\delta = \frac{g}{6C} = \frac{1}{2}\omega d$, d 为系统阻尼率; ω 为系统角频率; φ 为接地电弧熄灭时电源电压和故障电流之间的初相角。

恢复电压的速度与故障点电弧能否重燃关系密切, 故求解恢复电压速度为

$$\frac{\Delta u_r}{\Delta t} = \frac{\max \{ U_{phm} [e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-\delta t} e^{j(\omega_0 t + \varphi)}] \}}{\Delta t} \quad (4)$$

故障相恢复电压速度, 取故障相电压开始恢复后首个半波最大值比恢复到该时刻的恢复时间, 与其脱谐度 v 正相关。即脱谐度越大, 电弧越不容易熄灭, 但目前对于系统单相接地故障电弧恢复电压与脱谐度之间的关系尚不清楚。

1.4 脱谐度与故障后谐振电压关系分析

脱谐度影响零序电压的恢复时长。脱谐度越小, 对接地电弧的熄灭越有利, 根据式(2)分析可知, 在系统正常运行时, 通过合理的选取阻尼电阻, 可抑制低脱谐度状态下系统中性点的位移电压, 此时位移电压已不构成影响脱谐度的控制因素。但发生单相接地故障时阻尼电阻将被短接, 接地故障恢复后, 此时阻尼电阻并非立刻投入, 一般投入电压为 20%~25% 的相电压 U_{phm} , 如果将消弧线圈运行在接近全补偿 ($v \approx 0$) 的状态, 则可能发生系统谐振。

接地故障恢复后, 系统从故障状态切换回非故障状态, 其等值回路见图 4。电感和电容两端在 0 时刻存在电压, 而由于三相的不平衡存在一个不平衡电压 U_{bd} 。

根据基尔霍夫电流定律有

$$i_R + i_L + i_C = 0 \quad (5)$$

由于是并联回路

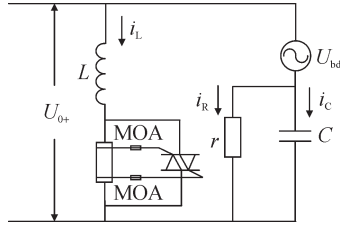


图4 接地故障恢复等值电路

Fig. 4 Ground fault recovery equivalent circuit

$$u_0 = u_L = u_r = u_{bd} + u_C = L \frac{di_L}{dt} \quad (6)$$

可以推导出

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d(L \frac{di_L}{dt} - u_{bd})}{dt} = CL \frac{d^2 i_L}{dt^2} - C \frac{du_{bd}}{dt} \quad (7)$$

结合式(5)、(7)可以得到关于流经消弧线圈电流 i_L 的微分方程。

$$\frac{L}{R} \frac{di_L}{dt} + i_L + CL \frac{d^2 i_L}{dt^2} = C \cdot U_{bd} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

式(8)的微分方程,其解为 $i_L = i'_L + i''_L$, i'_L 为其通解,而 i''_L 为其特解,其通解可以写作

$$i'_L = \frac{i_L(0^+) \cdot \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (9)$$

认为时间 t 为无穷的时候,即零序电压衰减到稳态时的值,则其特解为

$$I''_L = \frac{U_{bd}}{j\omega L + \frac{j\omega C \cdot r}{j\omega C + r}} \quad (10)$$

式(10)中: I''_L 为特解 i''_L 的极坐标形式; L 为双消弧线圈折算后的电感值,不平衡电压 U_{bd} 为

$$U_{bd} = \frac{j\omega E_A (C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C)}{3r + j\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (11)$$

式(11)中, $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, $\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$, 为单位向量。

当系统确定后,不平衡电压便无法改变文中从以下几个方面分析脱谐度和阻尼电阻对系统运行的影响,从而确定其设置范围。

通过以上分析,维持系统的稳定运行需要保证正常运行位移电压不超标,需要合理设置阻尼电阻参数;发生单相接地故障时故障电弧可自主熄灭,需要考虑系统残流、故障相恢复电压初速度以合理设置运行脱谐度;单相接地故障消失后,需要保证系统不发生系统谐振或虚幻接地,需要说设置的脱谐度远离谐振点。其中故障后的残流以及故障相电压恢复速度两参数的限值目前缺少实验依据。

2 分散式补偿策略优化限值实验研究

以某真实 220 kV 变电站对消弧线圈运行参数优化限值开展实验研究,其系统线路图见图 5。该系统由 1 台 220 kV 主变提供电源,带南北 2 条母线,试验期间 1 号主变运行带 66 kV 南母线,保留 5 条试验出线,线路总长度约 64.2 km,系统电容电流约 18 A,通过在 220 kV 变电站内加装电容器对系统容量进行补偿使得电容电流达到 85.03 A,系统中馈线 1、5 分别带 1 台消弧线圈。接地故障试验装置及现场布置图见图 6,利用图 6 装置,在接地点模拟系统发生单相弧光接地故障的情况。

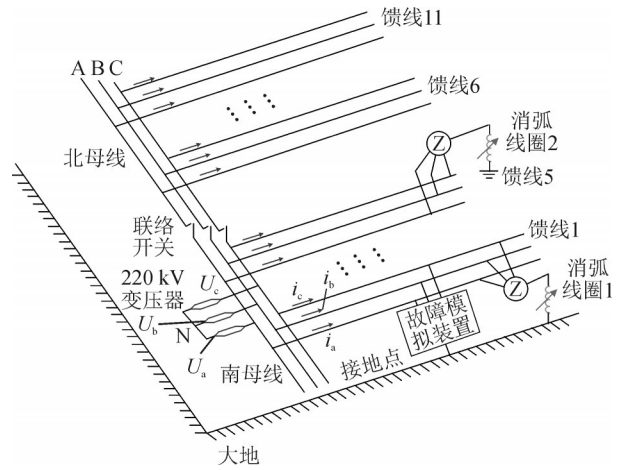
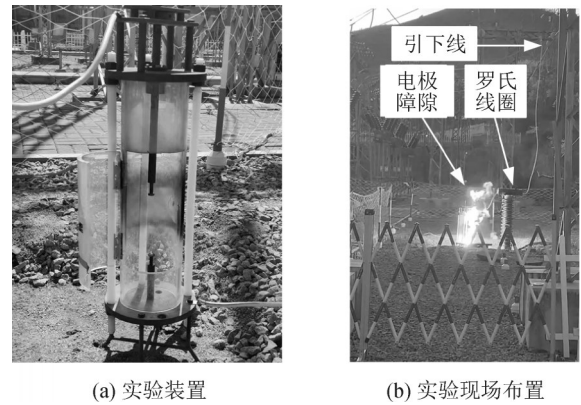


图5 接地故障试验系统运行方式

Fig. 5 Ground fault test system operation mode



(a) 实验装置

(b) 实验现场布置

图6 接地故障试验装置及现场布置图

Fig. 6 Ground fault test device and site layout

2.1 基于残流的脱谐度阈值实验研究

通过现场实测数据,对比某 66 kV 系统设置在不同脱谐度下,在接地故障发生时的电弧特性,分析残流对熄弧的影响。试验时,消弧线圈 1 补偿电流 50 A,消弧线圈从 5 档调至 8 档形成残流级差,分别补偿电流 42.8~58.9 A,具体补偿电流及残流理论值见表 1。

表1 对比试验工况

Table 1 Comparative test conditions

系统容流/A	消弧线圈 档位	补偿电 流/A	脱谐 度/%	残流/ A
85.03	5	92.8	9.14	7.77
85.03	6	97.9	15.14	12.87
85.03	7	103.3	21.49	18.27
85.03	8	108.9	28.07	23.87

对比分析不同脱谐度的电弧发展过程,随补偿系统脱谐度的增加会增大接地残流,使弧道电离更加充分,使接地电弧不易自行熄灭。

电极两端的电压及电流实测波形见图7。

当残流为7.77 A时,间隙击穿后形成稳定的工频电弧,又经过0.06 s在电流工频过零处熄弧。熄弧后故障相电压开始建立并在0.6 s后间隙被重击穿,电弧开始重燃,电流伴随着明显的零休和尖峰化现象,说明此时电弧极不稳定,电弧维持0.36 s后在工频过零熄弧后不再重燃。

当残流为12.87 A时,间隙击穿后形成稳定的工频电弧,电弧电流有明显的零休特征,但工频电弧在整个故障期间未能自熄。电弧电流在0.5 s附近处出现3次尖峰化,峰值低于残流为7.77 A时的情况,说明电弧燃烧相对稳定。

在残流增加到18.27 A以上,电弧基本稳定燃烧且零休时间极短,基本不存在明显尖峰化现象。

残流的电动力和热效应对故障点弧道具有破坏作用,残流越大,这种破坏度越剧烈或电离越充分,介质绝缘强度越不易恢复,导致电弧越不易熄灭。所以控制脱谐度的目标之一是通过脱谐度来控制残流的大小。通过该试验定间隙获得试验数据,其间隙下的熄弧临界电流约7 A,即利用脱谐度控制残流在7 A以下,可以使得接地电弧在很大概率上自然熄弧。

2.2 基于相电压恢复速度的脱谐度阈值实验研究

接地电弧过零熄灭后是否重燃,另一项重要的指标是故障相的恢复电压,下面将进一步分析脱谐度 ν 对故障相恢复电压的影响。

在一段电容电流为24 A母线上开展的人工单相接地电弧试验统计数据见表2。将补偿系统运行在不同脱谐度下,分别对1 s内电流过零熄灭后的恢复电压第一个工频半波峰值的平均值、稳定燃弧时间进行了统计。

随着脱谐度的增大,恢复电压上升速度不断加快,稳定燃烧的工频电弧时间也在变长,实测波形见图8。

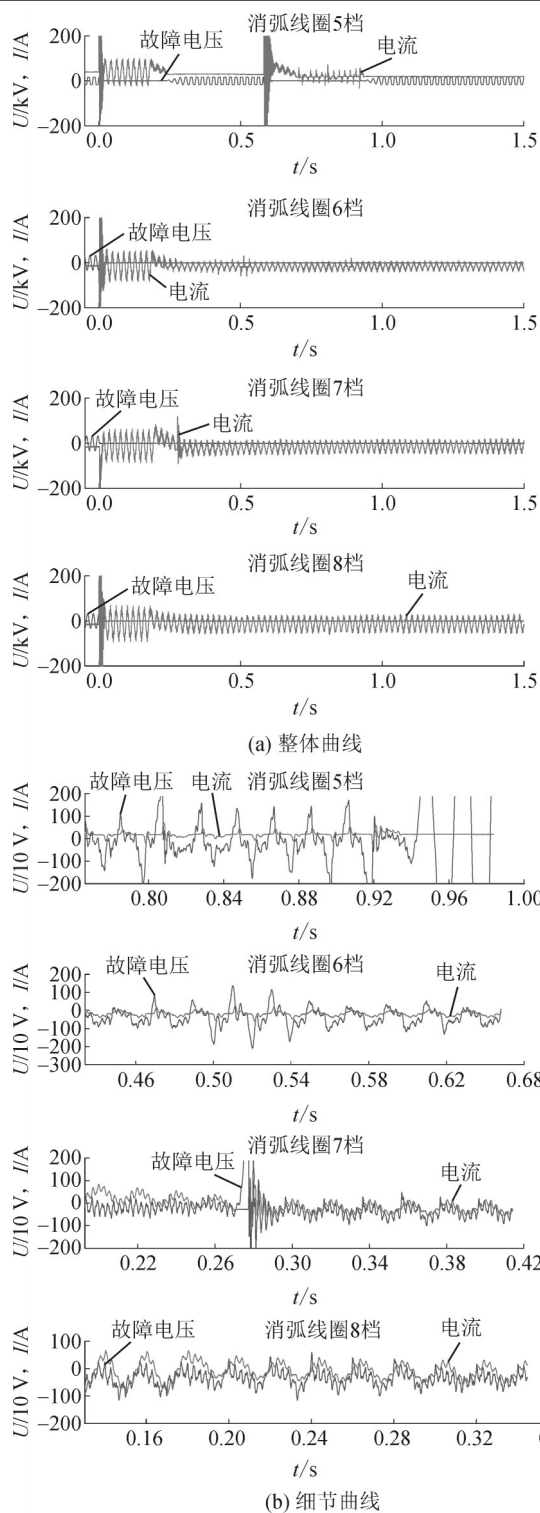


图7 不同残流下系统的熄弧特性电压电流实测波形
Fig. 7 Measured waveforms of voltage and current of arc-extinguishing characteristics of the system under different residues

在残流为6.03 A时,实测波形见图8(a),电弧在第一个工频电流过零后即熄灭,稳定燃弧约10 ms,熄弧后电压恢复速度522 V/ms。随着脱谐度的增加,故障相恢复电压在电弧熄灭后第一个工频半波峰值逐渐增大,稳定燃弧时间逐渐减少。在残流为27.66 A时,实测波形见图8(b),由于弧道电离充分,

表2 不同脱谐度下电弧过渡参数统计

Table 2 Statistics of arc transition parameters under different degrees of detuning

残流/ A	脱谐度/ %	恢复电压 峰值/V	稳定燃弧 时间/ms
6.03	25	1 849	10
11.49	48	3 579	140
17.69	74	4 270	250
23.04	96	零休极短	稳定燃烧
27.66	115	零休极短	稳定燃烧

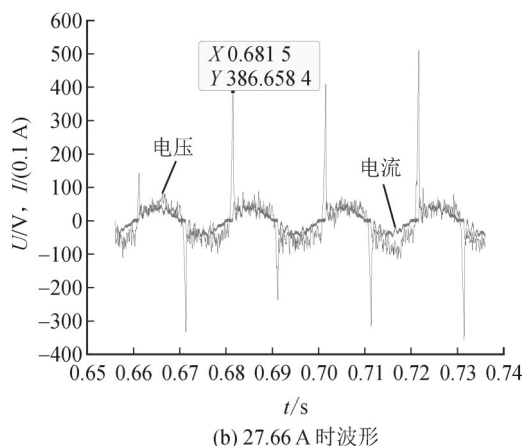
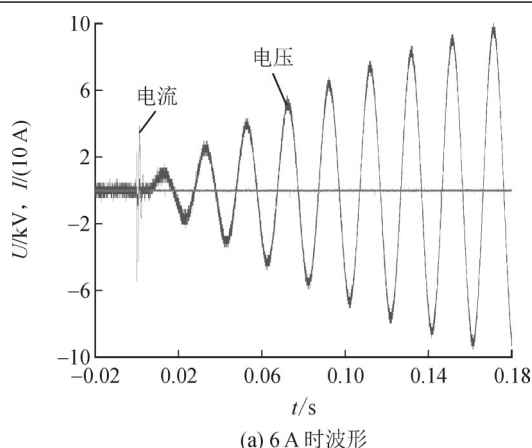


图8 不同脱谐度恢复电压、故障电流实测波形

Fig. 8 Measured waveforms of recovery voltage and fault current with different degrees of detuning

电压没有恢复到峰值即发生击穿,恢复电压平均恢复到 356 V,零休时间极短,熄弧后电压恢复速度 2 729 V/ms,电弧呈稳定燃烧状态。结合理论和试验分析,脱谐度越低,恢复电压上升越缓慢,因此发生重燃的概率也就越低,所以当故障恢复电压初始速度为 500 V/ms 以下时,系统中的电弧大概率不会长期持续燃烧。

3 分散式补偿策略及仿真验证

根据分布式补偿策略数学模型,实验研究确定的残流及故障相恢复电压指标及运行经验,可以得

到分布式补偿策略。

3.1 分散式补偿策略及模型

首先,为保证系统正常运行位移电压不超限,根据行标 DL/T 1057—2007《自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件》中要求及运行经验,阻尼电阻应使系统正常运行时位移电压不高于相电压的 5%,为使计算结果保有一定余量,则设置优化后的的位移电压百分比不高于 4%;其次,考虑故障时熄弧特性的影响,调节脱谐度使得残流应小于 7 A,使得故障相电压恢复速度低于 500 V/ms;最后考虑故障消失后,不应引起谐振或虚幻接地,目前常用的可控硅形式的阻尼电阻投切装置,其控制采用流过消弧线圈的电流作为指标,当流经消弧线圈的电流小于 7 A 时,阻尼电阻可以全部投入。为了不影响系统电容电流的估算,阻尼电阻应尽量小,为了保证系统不会谐振,则脱谐度应尽量大。

根据以上分析,可列出约束方程为:

$$u_0 = \frac{|U_0|}{|E_A|} < 4\% \quad (12)$$

$$I_e = v \cdot I_C < 7 \quad (13)$$

$$v_r = \Delta u_r / \Delta t < 500 \quad (14)$$

$$|I''_L| = \frac{|U_{bd}|}{\left| j\omega L + \frac{j\omega C \cdot r}{j\omega C + r} \right|} < 7 \quad (15)$$

式(12)–(15)中: I_C 为系统的电容电流; I_e 为消弧线圈补偿后的残流, A; v 为系统的脱谐度; U_0 为中性点电压; E_A 为系统相电势; v_r 为故障相电压恢复速度, V/ms; Δu_r 为故障后相电压恢复首半波幅值; Δt 为故障相电压恢复时间; $|I''_L|$ 为故障后无阻尼电阻条件下零序电流幅值, A。

约束方程可以表示为

$$f = \frac{u_0}{v} = \frac{\frac{E_A \cdot j\omega C_A + E_B \cdot j\omega C_B + E_C \cdot j\omega C_C}{j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L_1 + R_1} + \frac{1}{j\omega L_2 + R_2}}}{\frac{1}{\omega^2 C_0 L_1} + \frac{1}{\omega^2 C_0 L_2} - 1} \quad (16)$$

在满足式(12)–(15)约束条件的前提下,求使得约束方程(16)最小的脱谐度以及阻尼电阻参数,由此能够最大化的保证谐振接地系统的稳定运行。

3.2 分散式补偿模型的求解

由于实际中需要设置配置的消弧线圈参数有两台消弧线圈的档位即 L_1 和 L_2 , 两台消弧线圈的阻尼电阻 R_1 和 R_2 。其中约束方程的最小值对应的脱谐度和阻尼电阻即为最优值,文中采用梯度下降法进行寻优。

将约束方程简化写作

$$f(x) = Ax - y \quad (17)$$

目标函数 f 有4个参数,分别是弧线圈的档位即 L_1 和 L_2 ,两台消弧线圈的阻尼电阻 R_1 和 R_2 。设变量 $x_k = [L_{1k} \ L_{2k} \ R_{1k} \ R_{2k}]$, x_{k+1} 可以写作

$$x_{k+1} = x_k + \theta_k g_k \quad (18)$$

式(18)中, $g = A^T(Ax - y)$ 为迭代前进方向。所以对于最优解的搜索方法可以看作是沿着 $x_k + \theta_k g_k$ 方向最小化目标函数 f ,从而得到此时的 θ_k 为

$$\theta_k = \min f(x_k + \theta_k g_k) \quad (19)$$

求解这个优化问题,需要对 θ_k 求导,并且结果等于0。

$$\frac{\partial f(x_{k+1})}{\partial \theta_k} = 0 \quad (20)$$

3.3 分散式补偿策略仿真验证

以一实际 66 kV 谐振接地系统为例,改系统容流约 50 A,自然不平衡度为 2%,系统阻尼率为 0.15%,系统的三相电容分别为 $C_A = C_B = 1.65 \mu\text{F}$, $C_C = 1.65 \mu\text{F}$ 。在约束条件范围内,约束方程与脱谐度及阻尼电阻的某次迭代路径见图 9,图 9 中参数将双消弧线圈等效为单消弧线圈进行表示。

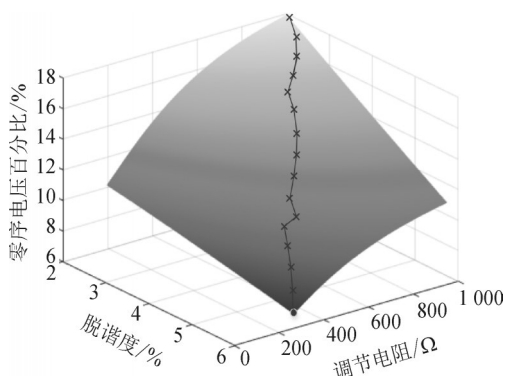


图 9 约束方程与脱谐度及阻尼电阻收敛路径曲线

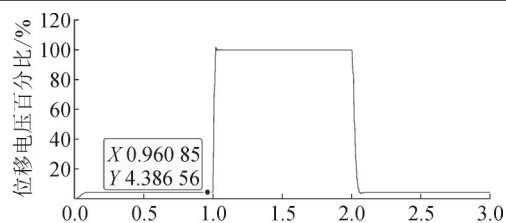
Fig. 9 Constraint equation, detuning degree and damping resistance convergence curve

通过迭代寻优,设定脱谐度为 5.35%,其中 $L_1 = L_2 = 4.6 \text{ H}$, $R_1 = R_2 = 626 \Omega$,利用该参数对见图 1 仿真模型,通过仿真模拟系统运行,仿真结果见图 10。

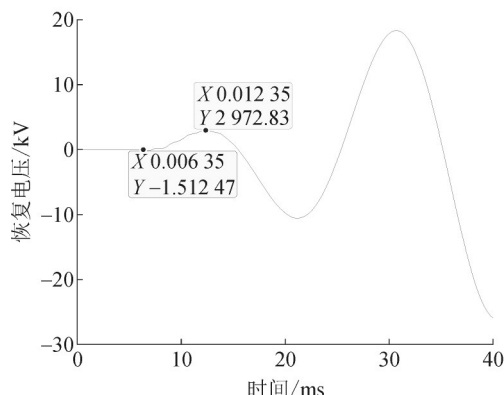
从图 10 中可以看出,正常运行时的位移度约 4.38%,故障相电压恢复速度约等于 $\frac{2972-0}{12.35-6.35} = 495 \text{ V/ms}$,小于 500 V/ms,中性点电压经过了 0.1 s 后就衰减到了故障峰值时的 10%,不会引起谐振风险,验证了文中提出的校核策略的有效性。

4 结论

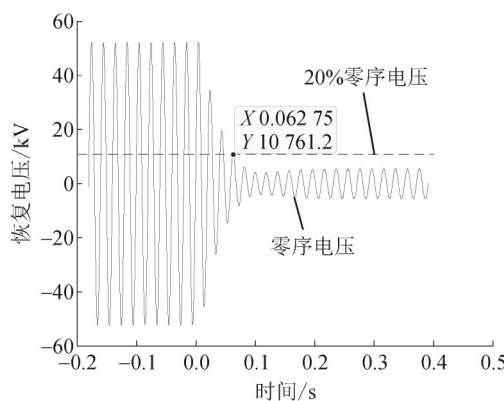
文中为解决分散式补偿的 66 kV 谐振接地系统



(a) 位移电压百分比



(b) 故障相恢复电压曲线



(c) 零序电压衰减曲线

图 10 校核后的系统仿真波形

Fig. 10 System simulation waveform after calibration

消弧线圈准确调谐和阻尼电阻整定困难问题,通过理论分析及实验研究脱谐度、阻尼率与系统稳定运行之间的约束关系及边界条件,并提出谐振接地系统分散式补偿策略,通过仿真分析验证了该策略的有效性并得到如下有益结论。

1)为保证分散式补偿的 66 kV 谐振接地系统稳定运行,应合理配置阻尼电阻及脱谐度,保证系统正常运行时的位移电压在允许的范围内,发生单相接地故障时电弧应能够自然熄灭,单相接地故障切除后,系统不会发生谐振。

2)补偿策略的约束条件,应设置阻尼电阻最小值使得位移电压不超过相电压的 4%;设置脱谐度最大值以保证残流不大于 7 A,故障相恢复电压初速度低于 500 V/ms;设置脱谐度最小值使得故障后流经消弧线圈的电流能够自然衰减至低于 7 A。

3)在约束条件内利用梯度下降法搜索约束方程的极小值点,得到阻尼电阻参数的极小值,提高系统电容电流的计算精度,脱谐度参数的极大值,保证系统不会谐振,通过对一实际算例进行仿真分析,验证了所提策略的有效性。

4)文中提出的校核策略在校核过程中需要准确测量系统的对地电容、三相不平衡电压及消弧线圈各档位准确参数,针对此问题,可通过在变电站建立集中监控系统获取相关参数信息。

参考文献:

- [1] 郝越峰. 主动干预式消弧装置故障选线方法[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 184-188.
HAO Yuefeng. Fault line selection method of active interference arc suppression device[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 184-188.
- [2] 李文龙, 何山, 王维庆, 等. 主动干预型消弧装置应用性研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 1-9.
LI Wenlong, HE Shan, WANG Weiqing, et al. Applied research on active intervention-type arc extinguishing devices[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 1-9.
- [3] 梁洪湘, 曾祥君, 喻锐, 等. 基于有源逆变分相注入的电压消弧与位移电压抑制方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 51-60.
LIANG Hongxiang, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Voltage arc suppression and displacement voltage suppression method based on active inverter separate phase injection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 51-60.
- [4] 陈虢, 刘红文, 黄继盛, 等. 基于ZNy11-Dyn7型无源降压消弧器件的高阻接地故障选线新方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 45-54.
CHEN Xiao, LIU Hongwen, HUANG Jisheng, et al. New method for high-resistance-grounding-fault line selection based on ZNy11-Dyn7 passive step-down arc suppression device[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 45-54.
- [5] 邵文权, 徐嘉鹏, 卫晓辉, 等. 采用PI+重复控制策略的配电网有源电流消弧方案[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(5): 87-94.
SHAO Wenquan, XU Jiapeng, WEI Xiaohui, et al. An active current arc suppression scheme using PI and repetitive control strategy for distribution networks[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 87-94.
- [6] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] YAO Huannian, CAO Meiyue. Power system resonance grounding[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [7] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123.
- [8] 刘健, 王毅钊, 张小庆, 等. 配电网单相接地故障处理保护化关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 18-23.
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 18-23.
- [9] 李辉, 田野, 陈江波, 等. 一二次融合成套断路器单相接地故障处置真型试验技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 158-165.
LI Hui, TIAN Ye, CHEN Jiangbo, et al. Research on a single-phase grounding fault handling true test of primary and secondary integration circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 158-165.
- [10] 丁敬明, 邹贵彬, 周成瀚, 等. 考虑参数不对称的配电网单相接地故障柔性消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 58-67.
DING Jingming, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A flexible arc suppression method for a single-phase grounding fault in a distribution network considering parameter asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 58-67.
- [11] 魏科文, 张靖, 何宇, 等. 基于VMD和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 105-113.
WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 105-113.
- [12] 丛子涵, 刘亚东, 王鹏, 等. 10 kV配电网断线坠地故障地表电势分布及安全距离研究[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 101-107.
CONG Zihan, LIU Yadong, WANG Peng, et al. Study on surface potential distribution and safety distance of disconnected grounding fault in 10 kV distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 101-107.
- [13] 李景丽, 刘鹏, 赵子敬, 等. 中低压配电网单相接地故障熄弧处理方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 125-132.

- LI Jingli, LIU Peng, ZHAO Zijiang, et al. Treatment methods of single-phase grounding fault arc extinction in medium and low voltage distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 125-132.
- [14] 王立婷. 配电网单相弧光接地故障特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.
- WANG Liting. Study on single-phase arc grounding fault characteristics of distribution network[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [15] 姚文强, 林辛炯, 车嘉, 等. 沈阳某 66 kV 变电站综合能源技术改造方案分析[J]. 东北电力技术, 2022, 43(2): 37-41.
- YAO Wenqiang, LIN Xintong, CHE Jia, et al. Analysis on comprehensive energy technology transformation scheme of 66 kV substation in shenyang[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(2): 37-41.
- [16] 王辉, 付凌云, 孙世民, 等. 海上风电场集电系统电压选择研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 112-119.
- WANG Hui, FU Lingyun, SUN Shimin, et al. Study on voltage selection of the power collection system of offshore wind farms[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 112-119.
- [17] 自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件: DL/T 1057—2007[S]. 2007.
- Technical requirements for complete set of automatic tracking compensation arc suppression coil: DL/T 1057—2007[S]. 2007.
- [18] 杨林, 王亮, 赵守忠, 等. 变电站 66 kV 母线三相电压不平衡研究[J]. 电气技术, 2017(1): 61-64.
- YANG Lin, WANG Liang, ZHAO Shouzhong, et al. Research on three-phase voltage unbalance of 66 kV bus in substation[J]. Electrical Engineering, 2017(1): 61-64.
- [19] 刘健, 陈曦子, 张志华, 等. 基于消弧线圈调制信号相关检测的高阻单相接地选线[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 63-70.
- LIU Jian, CHEN Xizi, ZHANG Zhihua, et al. High resistance single-phase grounding line selection in resonant grounding systems based on correlation detection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 63-70.
- [20] 李光军, 张彦, 高颂九, 等. 消弧线圈分布式补偿运行方式的研究[J]. 山东电力技术, 2011(5): 36-38.
- LI Guangjun, ZHANG Yan, GAO Songjiu, et al. Research for distributed compensation method of arc suppression coils[J]. Shandong Electric Power, 2011(5): 36-38.
- [21] 周志成, 王建刚, 魏旭, 等. 配电网单相接地分布式补偿特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1308-1312.
- ZHOU Zhicheng, WANG Jiangang, WEI Xu, et al. Distributed compensation performance while the single phase to earth fault occurring in the distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1308-1312.
- [22] 李金东, 王勇, 王猛, 等. 基于二次扰动的配电网单相接地故障有源电流消弧方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 72-78.
- LI Jindong, WANG Yong, WANG Meng, et al. An active current arc suppression method for single-phase grounding faults in the distribution network based on secondary current disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 72-78.
- [23] 刘国平, 张珊, 王聪, 等. 谐振接地系统调谐新方法的研究[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(6): 492-496.
- LIU Guoping, ZHANG Shan, WANG Cong, et al. Research on a new tuning method for resonant grounded system[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(6): 492-496.
- [24] 侯义明. 变电站消弧线圈大容量改造方案几个问题的商榷[J]. 供用电, 2016, 33(1): 72-75.
- HOU Yiming. Discussion on some problems of capacity expansion for arc suppression coil[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 72-75.
- [25] 张宇. 脱谐度对单相接地故障的影响分析[J]. 电力系统装备, 2019(5): 91-93.
- ZHANG Yu. Analysis of the influence of detuning degree on single-phase earth fault[J]. Electric Power System Equipment, 2019(5): 91-93.
- [26] 江渝, 刘和平, 冉立, 等. 连续调节消弧线圈接地系统单相接地故障谐振状态在线监测的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 35-40.
- JIANG Yu, LIU Heping, RAN Li, et al. Study on the judgement of resonance state during the single-phase ground in the distribution with the continuously adjustable arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 35-40.
- [27] 陈桥山, 王媛媛, 方涛, 等. 基于相间电流突变特征的可调消弧线圈接地系统选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 47-53.
- CHEN Qiaoshan, WANG Yuanyuan, FANG Tao, et al. A faulty feeder selection method for adjustable arc-suppression coil system based on phase-to-phase current mutation feature[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 47-53.
- [28] 陈忠仁, 吴维宁, 陈家宏, 等. 补偿电网阻尼率及脱谐度问题研究[J]. 继电器, 2005, 33(4): 36-39.
- CHEN Zhongren, WU Weining, CHEN Jiahong, et al. Study on damping rate and out-of-resonance degree of

- power compensation network[J]. Relay, 2005, 33(4): 36-39.
- [29] 陈忠仁, 李占琪. 消弧线圈的自动并联运行及其控制[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 72-77.
- CHEN Zhongren, LI Zhanqi. Automatic parallel operation and control of arc-suppression coil[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 72-77.
- [30] 李玲玲, 孙鹤旭, 王晓宏. 谐振接地电力网自动调谐的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 77-80.
- LI Lingling, SUN Hexu, WANG Xiaohong. A new automatic tuning method for resonance grounding power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 77-80.
- [31] 姚永峰, 周超, 崔应宇, 等. 配电网电容电流分布式补偿策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 139-144.
- YAO Yongfeng, ZHOU Chao, CUI Yingyu, et al. Distributed compensation strategy for capacitive current in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 139-144.
- 李冠华(1983—), 男, 正高级工程师, 研究方向为输变电设备运行、检测与事故分析(E-mail: 18624006262@126.com.cn)。

(上接第102页)

- Conference on Machine Learning. [S.l.]: PMLR, 2021: 11863-11874.
- [28] 张焕龙, 齐企业, 张杰, 等. 基于改进YOLOv5的输电线路鸟巢检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 151-159.
- ZHANG Huanlong, QI Qiye, ZHANG Jie, et al. Research on bird nest detection method for transmission lines based on improved YOLOv5[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 151-159.
- 伍箴燎(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为目标检测、图像处理(E-mail: 3218904968@qq.com)。
- 吴正平(1966—), 男, 博士, 教授, 研究方向为控制科学与工程(通信作者)(E-mail: wuzp@ctgu.edu.cn)。
- 孙水发(1977—), 男, 博士, 教授, 研究方向图像处理、计算机视觉(E-mail: watersun@ctgu.edu.cn)。