

# 基于过程免疫力的动态电压恢复器优化配置

黄瑞<sup>1</sup>, 肖先勇<sup>1</sup>, 陈振<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 优质电力园区以最低成本满足用户对电能质量的特殊需求, 成为解决电压暂降问题的新途径, 已在国内外开展了广泛的试点应用。针对中国优质电力园区规划缺少经济高效的优化配置方法的实际情况, 提出了一种基于过程免疫力的动态电压恢复器优化配置方法。基于工业过程电压暂降免疫力, 以满足用户用电需求为目标, 以治理设备购置费用最低为约束, 采用遗传算法对园区供电质量分级制定动态电压恢复器的优化配置方案, 实现工业园区电压暂降治理的经济性。对大型精密温控系统的电压暂降治理装置的优化配置方法进行仿真计算, 验证了所提方法的有效性与经济性。

**关键词:** 电压暂降治理; 过程免疫时间; 动态电压恢复器; 优化配置; 遗传算法

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)03-0050-06

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.03.012

## Optimal Configuration of Dynamic Voltage Restorer Based on Process Immunity

Huang Rui<sup>1</sup>, Xiao Xianyong<sup>1</sup>, Chen Zhen<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & Information Technology, Sichuan University,  
Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Premium power park meets the special needs of users for power quality at the lowest cost, and has become a new way to solve the voltage sag problem, which has been widely applied at home and abroad. Aiming at the lack of cost-effective optimization configuration method for premium power park in China, a dynamic voltage restorer optimization configuration method based on process immunity is proposed. To achieve the governance goals for economics and reliability, the genetic algorithm is adopted to optimize the power quality level combining with the process immunity, by the constrains of meeting customers' short-duration voltage variation quality demand and taking the minimum cost of the sag mitigation equipment as the objective. Through the simulation analysis of a precise temperature control system, the proposed configuration scheme is more cost-efficient compared with the traditional one.

**Key words:** voltage sag mitigation; process immunity time; dynamic voltage restorer; optimal configuration; genetic algorithm

## 0 引言

电能以其高效、清洁、适应性强等特点, 已逐渐成为当今社会使用最为广泛的二次能源, 电力行业也已逐步成为中国经济社会快速发展的基石。现代电力传输已普遍满足了普通用户的用电需求, 但在如今高度发达的工业和数字经济时代, 以微电子、计算机为主要设备的数字化和信息化技术企业以及基

于电力电子等技术的可再生能源发电系统, 对电能质量扰动的敏感度不断上升, 工业生产过程对电能质量提出了更高的要求<sup>[1-5]</sup>。在众多电能质量问题中, 电压暂降已成为最为突出的电能质量问题。

优质电力园区以最低成本满足用户对电能质量的特殊需求, 成为了解决电压暂降问题的新途径, 已在美国特拉华科技园区<sup>[6]</sup>、台南科技园区<sup>[7]</sup>、日本仙台科技园区<sup>[8]</sup>以及厦门示范区等开展了试点应用。优质电力园区的核心在于应用定制电力设备,

根据用户需求进行分级供电。

目前对定制电力装置在配电网中的优化配置问题多有研究。文献 [9] 基于遗传算法提出了电压质量调节器的优化配置策略, 解决了高渗透分布式发电配电网系统中的电压质量和电流谐波问题。文献 [10] 应用上下限约束法以及加权移动平均控制法, 对混合储能装置容量进行优化配置, 实现平滑分布式发电的输出功率和微电网负荷的削峰填谷。文献 [11] 采用遗传算法对配电网中动态电压恢复器 (dynamic voltage restorer, DVR) 的容量和位置进行优化, 但该方法由于 DVR 配置台数过多, 经济性较差, 不适用于优质电力园区。

为最小化定制电力设备优化配置的成本, 充分考虑工业过程的电压暂降免疫力, 以满足用户用电需求为目标, 以治理设备购置费用最低为约束, 采用遗传算法对园区供电质量分级, 制定定制电力设备的优化配置方案, 实现工业园区电压暂降治理的经济性。当前, 以超级电容器储能为储能系统的动态电压恢复器是进行电压暂降治理最有效设备, 下面以该设备为治理设备, 对大型精密温控系统进行仿真计算, 验证了所提方法的有效性与经济性。

## 1 动态电压恢复器

### 1.1 动态电压恢复器工作原理

DVR 是目前最有前途的电压暂降治理设备 [12-13]。它串联于电源与敏感负荷之间, 主要有旁路和运行两种工作模式。负荷正常运行时, DVR 被旁路, 由电源为负荷供电; 当系统发生电压暂降时, DVR 可以在毫秒级的时间内投入运行, 对负荷的供电电压进行有效补偿。DVR 主要由滤波电路、逆变电路和能量存储单元 3 部分构成, 如图 1 所示。滤波电路是实现功率变换必不可少的组成部分。滤波电路类型、安装位置和参数设计对 DVR 的性能有着非常重要的影响。逆变电路是 DVR 完成电压补偿功能的核心组成部分, 直接影响到 DVR 系统的整体工作性能。储能系统作为 DVR 的重要组成部分, 是 DVR 能量的直接来源, 主要有两种储能方式: 一种是采用专用的储能元件储能; 另一种是从系统直接获取能量。储能型 DVR 的容量可以从几十千伏安到几百兆伏安, 常见的储能方式有超导储能、飞轮储能、超级电容器和蓄电池。

由于 DVR 只在为负荷提供补偿电压时会出现功率消耗, 所以工作效率较高, 其性能远优于 SVC

与 DSTATCOM, 且较 UPQC 而言, 具有更高的经济效益。综上所述, 动态电压恢复器因其良好的动态性能和极高的性价比, 已成为了治理电压暂降问题最经济有效的手段。

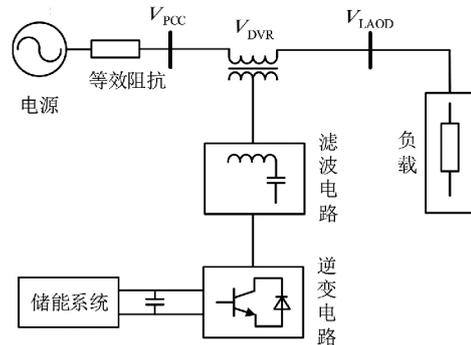


图 1 动态电压恢复器的运行原理

### 1.2 储能系统

储能系统作为 DVR 的重要组成部分, 是 DVR 能量的直接来源。从能源的供给方式来看, 主要有两种形式: 一种是采用储能系统为 DVR 提供补偿负载电压所需的有功功率和无功功率; 另一种是无储能系统的 DVR, 它直接采用不控整流桥, 从系统直接获得能量为负载提供无功支撑。由于无储能系统的 DVR 没有能量来源, 在补偿时只能发出无功功率, 因此补偿电压与负载电流之间的夹角为  $90^\circ$ , 使得其补偿能力大大降低。因此, 实际工程应用中多使用具有储能系统的 DVR。

储能系统的响应速度、容量大小、经济造价等方面对 DVR 有着极其重要的意义 [14]。储能系统的响应速度直接影响了 DVR 对电压暂降的补偿速度, 倘若储能系统响应速度过慢, 则可能会造成敏感设备的损坏。储能容量的大小直接关系着 DVR 的补偿效果, 容量越大, DVR 抑制电压暂降的能力越强。储能系统的造价随着储能容量和能量的增加而增加, 过大的储能容量与能量, 会造成不必要的资源浪费。综合上述 3 个方面, 通常用作 DVR 储能系统的主要有飞轮储能、超级电容器、超导储能和蓄电池, 具体参数对比见表 1 和表 2。从技术性和经济性两个指标出发,

表 1 常用储存系统参数对比

储能系统	额定功率 /kW	响应时间	功率密度 / (W · kg <sup>-1</sup> )
飞轮储能	5 ~ 5 × 10 <sup>3</sup>	秒级	5 × 10 <sup>3</sup>
超级电容器	1 ~ 100	秒级	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>6</sup>
超导储能	10 ~ 2 × 10 <sup>4</sup>	毫秒级	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>8</sup>
蓄电池	1 ~ 1 × 10 <sup>4</sup>	分钟级	200 ~ 315

以超级电容器为储能系统的 DVR 已广泛应用于工程实际中。

表2 常用储能系统费用比较

储能系统	能量成本 /(美元/kWh)	容量成本 /(美元/kW)
飞轮储能	96	1.2
超级电容器	711	6
超导储能	370 000	59
蓄电池	69	91

## 2 工业过程免疫力

一个工业过程通常由一组相互协同作业的设备组成。在大型复杂过程中,涉及的或相关的设备数量庞大,元件之间存在着复杂的电气连接或物理连接,无法仅单纯地依靠典型敏感设备的电压暂降免疫力来描述整个工业过程的抗电压暂降扰动的能力。CIRED、CIGRE 和 UIE 联合工作小组 C4.110 结合工业过程结构,分析工业过程中各设备的关键过程参数,提出过程免疫时间(process immunity time, PIT)的概念,以刻画工业过程电压暂降免疫力<sup>[15]</sup>。过程免疫时间为敏感过程经受给定幅值电压暂降时,过程参数超过极限阈值的时间,如图2所示。过程参数是指受生产过程中各子过程设备影响整个过程状态的物理指标,包括水温、油压、阀门流量等,与设备类型有关。图2中,  $P_{nom}$  为过程参数额定值;  $P_{limit}$  为过程参数极限阈值;  $t_1$  为暂降发生时刻;  $\Delta t$  为过程响应延时;  $t_2$  为过程参数越过  $P_{limit}$  的时刻, PIT 定义为

$$PIT = t_2 - t_1 \quad (1)$$

当暂降时间  $t < \Delta t$ , 生产过程正常; 当  $\Delta t < t < PIT$ , 生产过程可自动恢复至正常状态; 当  $t > PIT$ , 生产过程中断。PIT 越大, 生产过程抵抗电压暂降的能力越强, 免疫力越强。

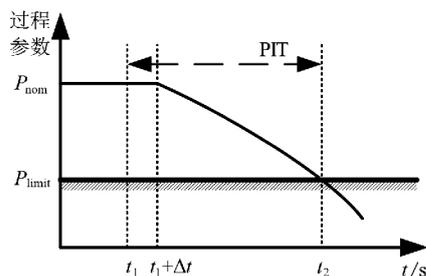


图2 过程免疫时间曲线

引入过程免疫时间,在对 DVR 储能系统进行配置时,考虑过程自身抵抗电压暂降的能力,减少储能能量,提高 DVR 配置的经济性。

## 3 DVR 优化配置方法

### 3.1 DVR 优化配置模型

动态电压补偿器对电压暂降的补偿能力主要取决于补偿容量与储能系统容量,补偿时间取决于储能系统的能量。动态电压补偿器与储能系统的补偿容量决定了对于给定过程所能补偿的电压幅值,而对于较长时间的电压暂降,储能元件所储存的能量很大程度决定了所能补偿的时间。因此,可得动态电压恢复器配置模型为

$$\begin{aligned} \min \text{Cost} &= \sum_{i=1}^{ND} P_{\text{cost}}^i_{\text{DVR容量}} + \sum_{i=1}^{ND} P_{\text{cost}}^i_{\text{储能容量}} + \sum_{i=1}^{ND} S_{\text{cost}}^i_{\text{储能容量}} \\ &= \sum_{i=1}^{ND} (P_{\text{DVR容量}} + p_{\text{储能容量}}) \cdot P_i + \sum_{i=1}^{ND} p_{\text{储能能量}} \cdot S_i \\ &= \sum_{i=1}^{ND} (P_{\text{DVR容量}} + p_{\text{储能容量}}) \cdot P_i + \sum_{i=1}^{ND} p_{\text{储能能量}} \cdot P_i \cdot T \end{aligned} \quad (2)$$

式中:ND 为园区内补偿设备的数量;  $P_{\text{cost}}^i_{\text{DVR容量}}$  为第  $i$  个 DVR 的容量成本;  $P_{\text{cost}}^i_{\text{储能容量}}$  为第  $i$  个储能系统的容量成本;  $S_{\text{cost}}^i_{\text{储能容量}}$  为第  $i$  个储能系统的能量成本;  $p_{\text{DVR容量}}$  为 DVR 单位容量成本;  $p_{\text{储能容量}}$  为储能系统单位容量成本;  $P_i$  为第  $i$  个补偿设备的容量;  $p_{\text{储能能量}}$  为储能系统单位储能能量成本;  $S_i$  为第  $i$  个补偿设备的储能能量;  $T$  为补偿时间。

PIT 可描述为工业过程能够抵御电压暂降的时间,是一种过程固有免疫特性,即是说,在园区母线最大电压暂降持续时间为  $t$  时,仅需对工业过程进行补偿的时间为  $T = t - PIT$ ,式(2)可改写为

$$\min \text{Cost} = \sum_{i=1}^{ND} (p_{\text{DVR容量}} + p_{\text{储能容量}}) \cdot P_i + \sum_{i=1}^{ND} p_{\text{储能能量}} \cdot P_i \cdot (t - PIT) \quad (3)$$

第  $i$  台 DVR 的单位容量成本是其容量的函数:

$$P_{\text{DVR容量}} = f(P_i) \quad (4)$$

式中  $f(P_i)$  为 DVR 的单位容量投资成本函数,二者函数关系如图3。

储能单元的能量成本一方面取决于能量的多少,另一方面也取决于储能系统的类型,几种常见的储能系统的费用如表2。

根据 DVR 补偿原理,不考虑相角跳变,以补偿短时电压变化后过程端电压大于或等于第  $i$  级过程的最大短时电能质量需求为约束:

$$U_1^i \geq \max \{ U_{\text{demand}(t)}^i \} \quad (5)$$

$$U_{\text{bus}} + U_{\text{DVR}}^i = U_1^i \quad (6)$$

式中:  $U_1^i$  为第  $i$  条馈线所接过程端电压;  $U_{\text{demand}(t)}^i$  为第  $i$  条馈线上第  $t$  个负荷的最大电能质量需求;  $U_{\text{bus}}$  为园区母线电压;  $U_{\text{DVR}}^i$  为第  $i$  台 DVR 的补偿电压。

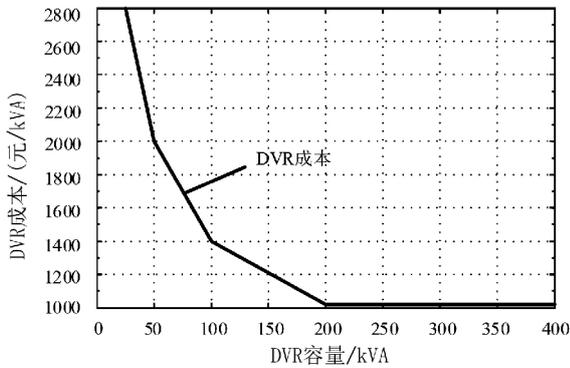


图3 DVR 的单位容量投资成本

需配置 DVR 容量与其输出补偿电压和补偿过程容量相关,可得 DVR 容量约束条件:

$$P_i = \frac{U_{\text{DVR}}^i}{U_{\text{bus}}} \sum_{t=1}^T P_L^t \quad (7)$$

式中:  $T$  为供电质量第  $i$  级的总负荷数;  $P_L^t$  为供电质量第  $i$  级中第  $t$  个负荷的容量。

### 3.2 遗传算法

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是根据生物界中“物竞天择、适者生存”的生物进化论和遗传学理论而设计的优化算法,它主要模拟了生物进化过程中基因交叉、突变和选择进化等过程作为优化搜索空间的方式,寻求多目标优化问题的全局最优解。简单而言,遗传算法采用群体搜索技术,用种群代表一组解,以适应度作为选择、交叉和变异等一系列遗传操作的准则,通过数次遗传运算,使种群进化到包含近似最优解的状态。简单高效的基因编码方法,合适的适应度函数选择,选择算子、交叉操作和基因突变方法的设计是遗传算法的关键。

以用户供电质量需求为遗传算法的个体,采用二进制编码的方式对用户供电等级进行分级,依据 DVR 配置费用最低的适应度函数,对种群个体作遗传运算,最后得到最优配置方案。遗传算法计算流程如图4。其中,初始设定的0.6交叉概率和0.01变异概率。

具体 DVR 优化配置策略如下所示:

1) 初始化。输入园区原始数据,包括过程数量、各过程电能质量需求、过程容量、过程免疫时间以及初始化迭代次数  $N_g$  等。

2) 选取合适的编码方式对待求解问题进行编码,在该问题中是采用二进制编码对最优供电质量等级  $U_A$  和  $U_{AA}$  进行编码,形成种群  $V$  (初始解集)。其中,为简化计算,令  $U_{AAA}$  为定值,  $U_{AAA} = \max \{ U_1, U_2, U_3 \dots U_n \}$ 。

3) 以约束条件为适应度函数,计算每个个体的适应度  $C$ 。

4) 根据个体的适应度进行遗传运算,形成新的种群  $V+1$ 。其中,遗传运算包括了遗传、交叉和变异以及精英保留。

5) 判断迭代次数。若  $k < N_g$ ,则重复步骤3)至步骤5),否则对最优个体进行解码,输出最优供电质量等级限值电压  $U_A$  和  $U_{AA}$ 。

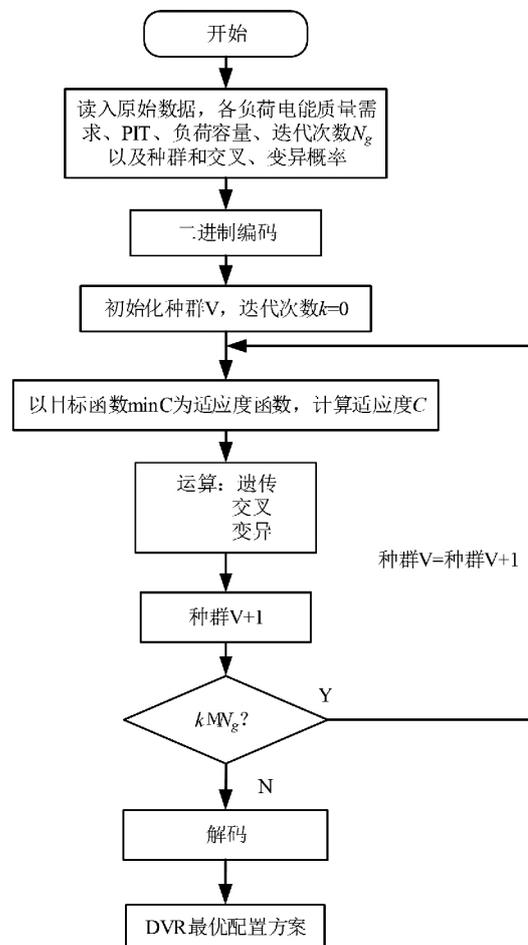


图4 遗传算法计算流程

## 4 算例分析

以某光学中心的精密温控系统为例,应用所提方法对该精密温控系统进行 DVR 优化配置,实现电压暂降的优化治理。其中,该温控过程由供风段、过滤段、表冷段、加热段、加湿段和送风段等 6 个环节组成,按功能逻辑各环节又可进一步划分为若干子过程(设备)。根据对该精密温控系统的实际调研和测试,其工业环节、工艺过程、容量及 PIT 值如表 3 所示。

表 3 精密温控系统工艺过程

工业环节	工艺过程	PIT /ms	过程容量 /kVA	供电质量需求 /%	过程编号
供风环节	通风机(新风)	90	24	65	过程 A
	通风机(回风)	110	27	65	过程 B
	过程控制系统	130	31.5	85	过程 C
过滤环节	通风机	145	32.4	65	过程 D
	过程控制系统	180	4.5	80	过程 E
表冷环节	压缩机	50	75.6	85	过程 F
	温度传感器	73	9	90	过程 G
加热环节	热处理器	45	150	62	过程 H
	温度传感器	70	9	90	过程 I
加湿环节	蒸发器	102	63	53	过程 J
	湿度传感器	65	12	74	过程 K
送风环节	通风机	30	45	65	过程 L
	过程控制系统	119	6.8	83	过程 M
	过程控制系统	78	5.4	90	过程 N

此外,为了对精密温控系统的电压暂降问题进行更为准确的治理,对系统接入点的电压暂降水平进行统计分析,包括暂降频次、幅值和持续时间等,也是十分必要的。对精密温控系统的 10 kV 母线接入点 2007—2014 年的电压暂降监测记录进行了统计分析,表 4 为接入点处不同幅值区间的电压暂降次数及平均持续时间,表 5 为精密温控系统接入点按年度统计的暂降情况。

由表 4 和表 5 可见,该精密温控系统接入点有较高的电压暂降水平,接入点暂降最低残余电压为

18%,暂降最长持续时间为 1220 ms。为提高电压暂降治理方法的可靠性拟在暂降最严重的情况下对该精密温控系统进行优化配置,即考虑暂降残余电压为 18%,持续时间为 1220 ms 的情况。基于精密温控系统的工艺过程、过程容量、供电质量需求和过程 PIT 值,考虑精密温控系统电压暂降最严重的情况,以补偿后的电压满足用户供电质量需求为目标,以设备购置费用最低为约束,采用遗传算法计算得到园区 DVR 最优配置方案如下:

1) 该精密温控系统的供电质量等级分为 2 级,即 A 级和 AA 级,相应地配置 2 台 DVR 与 2 台储能系统。2 台 DVR 补偿容量分别为 160.458 kVA 和 110.736 kVA, DVR 单位容量价格为 1 170.26 元和 1 359.2 元;2 台储能系统的能量分别为 0.053 kWh 和 0.036 kWh,具体的供电质量等级对应的子过程如表 6 所示。

表 4 精密温控系统接入点不同幅值区间的电压暂降次数及平均持续时间

残余电压	暂降次数	平均持续时间/s
85%~90%	124	0.128 1
70%~85%	73	0.177 1
40%~70%	9	0.112 2
10%~40%	2	0.075 0
0%~10%	0	0.000 0

表 5 精密温控系统接入点年度暂降情况统计

年份	暂降次数	最短持续时间/ms	最长持续时间/ms	平均持续时间/ms	最低残余电压/%
2007	21	19	1050	287.0	57
2008	36	20	1150	100.0	77
2009	28	9	599	215.3	80
2010	27	9	600	227.1	50
2011	40	9	380	61.4	55
2012	20	9	430	99.6	63
2013	24	19	1220	120.8	77
2014	12	19	80	53.7	18

表 6 供电质量等级划分

供电质量等级	过程	补偿容量/kVA	供电质量需求/%	储能能量/kWh	补偿时间/ms
A 级	过程 A、B、D、H、J、L	160.458	≥65	0.053	1190
AA 级	过程 C、E、F、G、I、K、M、N	110.736	≥90	0.036	1170

2) 所提出方案的设备购置总费用为 349 620 元, 对比传统的配置方式具有更好的经济性, 如表 7。

表 7 不同配置方案经济性比较

技术方案	配置总经费 /元	DVR 容量 /kVA	储能能量 /kWh
所提方法	349 620.0	271.194	0.089 0
单台 DVR	378 569.4	356.544	0.117 9
各工艺环节	643 280.2	336.729	0.108 4

3) 针对除超级电容器以外的储能方式进行了计算, 计算结果如表 8。通过分析计算结果发现, 飞轮储能方式具有最高的经济效益, 但如表 1 中所示, 飞轮储能方式功率密度较低, 充放电速度较慢, 因此在费用相差不大的情况下, 推荐选择超导电容器作为 DVR 的储能系统。

表 8 不同储能方式经济性比较

储能方式	配置总经费 /元	DVR 费用 /元	储能费用 /元
超级电容器	349 620	338 290.2	11 329.8
飞轮储能	340 530	338 290.2	2 239.8
超导储能	650 000	338 290.2	327 909.8
蓄电池	486 400	338 290.2	165 389.8

算例所采用的遗传算法具有可靠的收敛性, 收敛速度如图 5。

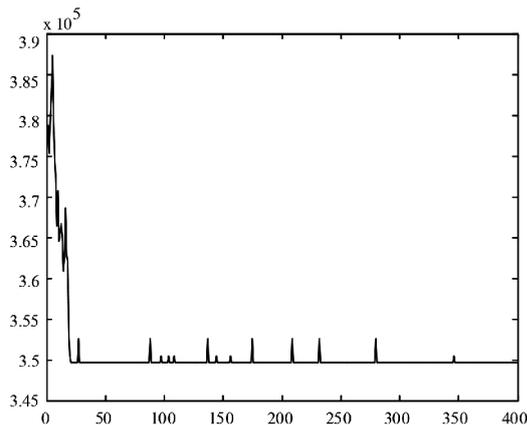


图 5 遗传算法收敛性

## 5 结 语

前面介绍了一种解决电压暂降问题的新途径——“优质电力园区”, 其核心在于应用定制电力设备, 根据用户供电质量需求进行分级供电。在传统方法仅粗略将供电等级划分为 A 级、AA 级和 AAA 级的基础上, 引入遗传算法以满足用户供电质量需求为目标, 同时以暂降治理设备费用最小为约

束, 对供电质量等级划分进行优化, 实现兼顾经济性和可靠性的暂降治理目标。在实际应用中, 采用暂降治理中广泛应用的 DVR 作为治理设备, 采用超级电容器作为 DVR 的储能系统, 对光学中心的精密温控系统进行电压暂降治理。仿真结果表明, 对比仅用单台 DVR 和对子过程分别治理的两种方案, 所提出的配置方法更具经济性。最后, 从经济性与技术性两方面印证了超级电容器是当前最适合于 DVR 的储能系统。

## 参考文献

- [1] 刘旭娜, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644 - 658.
- [2] Yan X, Venkataramanan G, Flannery P S, et al. Evaluation of the Effect of Voltage Sags Due to Grid Balanced and Unbalanced Faults on DFIG Wind Turbines [J]. EPE Journal 2010, 20(4): 51 - 61.
- [3] Biswas S, Goswami S K, Chatterjee A. Optimum Distributed Generation Placement with Voltage Sag Effect Minimization [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 53(1): 163 - 174.
- [4] Victor Floves Mendes, Clodualdo Venicio de Sousa, Selênio Rocha Silva, et al. Modeling and Ride-through Control of Doubly Fed Induction Generators during Symmetrical Voltage Sags [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2011, 26(4): 1161 - 1171.
- [5] Shareef H, Mohamed A, Marzuki N. Analysis of Personal Computer Ride Through Capability during Voltage Sags [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(12): 1615 - 1624.
- [6] Alexander Domijan, Alejandro Montenegro, Albert J F, et al. Simulation Study of the World's First Distributed Premium Power Quality Park [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2005, 20(2): 1483 - 1492.
- [7] Tzong - Yih G, Chiung - Yi H, Ching - Yun L, et al. Power Quality Task Force of Taipower: Experiences & Results on PQ Monitoring and Mitigation [C]. Sixth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (Asdcom 03), 2003: 41 - 48.
- [8] Keiichi Hirose, Takashi Takeda, Seiichi Muroyama. Study on Field Demonstration of Multiple Power Quality Levels System in Sendai [C]. The 28th International Telecommunications Energy Conference (IEEE Cat. NO. 06CH37806), 2006: 1 - 6.
- [9] 冯兴田, 韦统振, 齐智平. 配网中电压质量调节器的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 78 - 83.

(下转第 71 页)

在完成边相的加装后没有对中相再次紧固,会使中相发生松动。最后,厂家在安装夹件拉杆时,为减小铁心窗尺寸,在压板上开槽宽30 mm、深20 mm,这种开槽结构降低了压板的机械强度。

综上所述,该台110 kV变压器短路承受能力抽检不合格,是厂家在产品工艺控制及工艺设计上存在问题以及电磁线屈服强度不满足设计值要求导致变压器安全裕度降低等因素综合作用的结果。

### 5 整改措施

根据上述原因分析,对该110 kV变压器制定了整改措施,增加其轴向及幅向抗短路能力。

一是增加轴向抗短路能力的措施:

- 1) 中压硬纸筒厚度由3 mm提升至5 mm;
- 2) 整体套装时低压与中压套装后距离减小1 mm;
- 3) 增加内撑条数量;
- 4) 提高中压线圈电磁线屈服强度,设计采用 $R_{p0.2}$ 为250 N/mm<sup>2</sup>的半硬自粘换位导线。

二是增加辐向抗短路能力的措施:

- 1) 减小压板开槽的尺寸,将压板开槽宽30 mm深20 mm更改为宽25 mm、深10 mm;
- 2) 更改压紧工序工艺,按照B相→A相→C相→B相的顺序,在C相压紧完毕后,再次对B相进行压紧;
- 3) 垫方增加限位及薄弱区域加强压紧结构;
- 4) 在线圈整体套装时,用压敏纸进行检测,保证内外线圈的高度一致。

2018年12月,整改后的变压器在原第三方检

验中心按照原试验方案再次进行短路承受能力试验,试验通过。

### 6 结 语

变压器短路承受能力是变压器最重要的性能之一,抗短路能力不足会严重影响电网的供电可靠性。变压器短路承受能力是变压器综合性能的体现,每台变压器抗短路能力不足的原因都不尽相同,需要厂家设计可靠并严把产品质量控制关口,以确保设备安全可靠运行。

#### 参考文献

- [1] 胡启凡. 变压器试验技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 全国变压器标准技术委员会. 电力变压器 第5部分:承受短路的能力:GB 1094.5-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准:GB 50150-2016[S]. 北京:中国计划出版社,2016.
- [4] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [5] G. B. Kumbhar, S. V. Kulkarni. Analysis of Short-circuit Performance of Split-winding Transformer Using Coupled Field-circuit Approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2):936-943.

作者简介:

谢茜(1990),博士,工程师,主要从事变压器类设备状态评价、故障分析及新技术研究。

(收稿日期:2019-02-13)

(上接第55页)

- [10] 刘舒,李正力,王翼,等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3):78-84.
- [11] 盛晓光,韦统振,马明,等. 配电网中多台动态电压恢复器的优化配置研究[J]. 电网技术, 2013, 37(10):2991-2996.
- [12] Masoud Shahabadi, Hossein Iman-Eini. Improving the Performance of Cascaded H-bridge-based Interline Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1160-1167.
- [13] Parag Kanjiya, Bhim Singh, Ambrish Chandra, et al. "SRF Theory Revisited" to Control Self-supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Non-

linear Loads[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(5):2330-2340.

- [14] 范永宇. 动态电压恢复器的直流储能系统关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [15] 郑颖,刘旭娜,刘阳,等. 基于过程免疫时间和可接受后果状态的优质园区供电质量等级划分[J]. 电网技术, 2014, 38(1):211-216.

作者简介:

黄瑞(1994),硕士研究生,从事电压暂降相关研究;  
肖先勇(1968),博士,教授,博士生导师,从事不确定性理论在电力系统的应用、电能质量、智能电网等的教学和科研;  
陈振(1991),博士,主要从事电力系统数据科学研究。

(收稿日期:2019-04-07)