配电网电能质量调节装置集散配置策略

冯兴田，孙添添，马文忠

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院，山东 青岛 266580)

摘要：配电网结构复杂，负荷多样，存在多种电能质量问题，需采用相应的电能质量调节装置进行改善。通过分析配电网的电能质量问题的特点及四种电能质量调节装置的特性和适用范围，提出了配电网电能质量调节装置集散配置策略。根据现场工况和用户需求建立数学模型，提出优化配置的目标函数和约束条件。详细分析基于功能、装置、投资的集散配置策略的实施方案和特点，有机结合集中、分散配置，基于遗传算法形成协调统一的集散配置策略。仿真算例对以 IEEE33 节点为架构的配电网安装的电能质量调节装置进行了优化配置分析，结果表明，集散配置策略有效解决电能质量问题，优化配置了需投入的装置。

关键词：电能质量；集散配置；遗传算法；D-FACTS 装置；优化目标

Centralized and dispersed allocation strategy of power quality regulating devices in distribution network

FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Distribution network (DN) has complicate structure and different loads which lead to many kinds of power quality problems. Power quality regulating equipments (PQRE) should be adopted to improve the problems. Characteristics and applicability of four PQREs and power quality problems of DN are analyzed. And PQREs centralized and dispersed allocation strategy (CDAS) of DN is proposed. The target function and constraint condition of optimal allocation are presented and mathematical model is established according to field conditions and customer requirement. CDAS implementing plan and feature are analyzed in detail based on function, equipment and investment. Unified CDAS is formed by combining centralized allocation with dispersed allocation based on genetic algorithm. Simulation example analyzes optimal allocation of PQREs in distribution network with IEEE 33 nodes. The results show that CDAS effectively solves power quality problems and optimizes installed equipments.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184 and No. 51207170) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 14CX02085A).

Key words: power quality; centralized and dispersed allocation; genetic algorithm; D-FACTS equipments; optimal target

中图分类号： TM933.4 文章编号： 1674-3415(2015)24-0033-07

0 引言

配电网由于电力系统的非线性特性、电力系统故障、带有非线性负载等问题，引发多种电能质量问题；随着大量分布式发电源 DG 的并网运行，在配电网局部形成高渗透率时，将使电能质量问题更为严峻。配电网系统中，长输电线路带来电压暂降问题；冲击性负荷将引起电压波动与闪变等电能质量问题；变频设备等电力电子装置提高系统工作效率和功率因数的同时，却引入了大量谐波。而在我国的智能电网发展目标中，要求配电网增强接纳分布式能源系统接入能力的同时，明确提出了配电网中的电能质量问题：满足经济社会电能质量的多元化要求，实现最佳的电能质量和供电可靠性。电能质量问题已经成为影响用电效率、用电安全的重要因素，用户对电能质量改善的要求越来越迫切[1-3]。

配电网中引入电能质量调节装置PQRE，可有效

基金项目：国家自然科学基金项目(51477184，51207170)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(14CX02085A)

改善多种电能质量问题。配电网电能质量调节装置又称柔性交流配电系统(D-FACTS)装置，其类型较多，诸如动态电压恢复器DVR、有源滤波器APF、配网静止无功补偿器D-STATCOM、统一电能质量调节器UPQC等等，通常具备一种或多种电能质量改善能力。多台电能质量调节装置联合运行，可实现区域配电网电能质量的综合治理。目前国内外学者对电能质量调节装置的研究较多，但主要针对某一种电能质量调节装置的控制进行配电网局部电能质量问题研究及应用分析[4-5]。配电网中含多台及多种电能质量调节装置的研究还处于初步阶段，文献[6]仅从经济性角度分析了区域配电网中DVR、D-STATCOM之间容量的配比，文献[7]则研究了优质电力园区根据电压暂降幅度确定DVR、SSTS设备的投切运行问题。另外，对于UPQC的研究，已经对其串并联变流器及直流储能环节的匹配问题进行了分析[8]。针对多种灵活交流输电系统(FACTS)装置的控制与配置已有较多研究[9-10]，但FACTS装置用于改善系统潮流，而D-FACTS装置用于改善电能质量，他们的控制目标不同，相应的配置策略也大相径庭。

本文针对配电网的复杂电能质量问题，应用电能质量调节装置进行改善；并针对电能质量调节装置的特点和用户的需求，确定恰当的控制方式，因地制宜，提出配电网电能质量调节装置集散配置策略。通过集中/分散配置策略，实现电能质量调节装置的组合配置、安装位置、补偿效果、投资成本的最优化。典型配电网为例的仿真分析验证了该策略的适用性。

1 电能质量调节装置特性及应用

电能质量调节装置类型较多、功能不一，其中广泛用于配电网的主要有 DVR、APF、D-STATCOM (图 1)，性能优良、特点突出；另外，功能最为全面的 UPQC 也逐步走向市场，下面主要分析这四种 D-FACTS 装置的基本结构、性能特点、适用范围以及实际应用和研究问题。

DVR 作为一种串联补偿装置，主要用于解决电压暂降、电压骤升、电压波动等电源侧的电能质量问题。世界各大公司相继有新产品研发，可以动态补偿负载电压，容量范围 100 kVA~30 MVA，性能指标不断改善。图 1(a)是一种常见的 DVR 结构，电压型逆变器根据需求输出相应电压，直接耦合或通过变压器耦合串入所需补偿回路，当电网电压波动时保证负载上的电压稳定，逆变器能量可来自于储能装置或取自电网电压[11]。配电网由于部分用电负荷的位置偏远，输电线路长，电压在线路上损失大，导致线路末端电压过低，影响正常生产，采用 DVR 可有效解决这一问题；

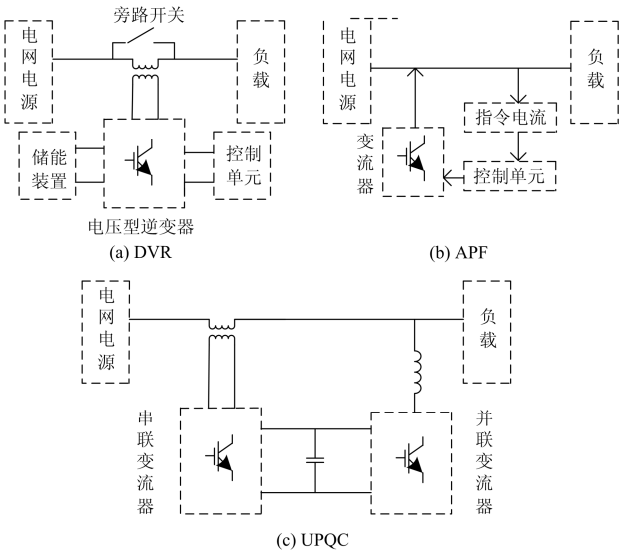

图 1 电能质量调节装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of PQRE

大量负荷同时接入或退出运行时，或大容量 DG 并网、离网等情况下，引起的电压暂降、骤升的问题可通过 DVR 得以解决；另外，当发生故障短时断电时，DVR 可保证电压敏感设备正常工作。

APF 通常并联在配电网中，用来补偿电力系统谐波。APF 的现有产品可以动态补偿负载电流，滤波电流范围 50~3 600 A。图 1(b)为 APF 的基本结构示意图，采样负载电流获取谐波电流含量，形成指令电流，通过控制单元令变流器输出相应电流矢量，实现谐波治理[12]。配电网中含有大量非线性负荷，引起电网电流畸变，造成谐波污染；大功率冲击性和波动性负荷会产生大量的高次谐波；交流变频系统的引入也会带来大量谐波，尤其是在一些医院、商场、通信行业、工矿企业等，谐波问题尤为突出。通过在合适的位置安装 APF 可以有效滤除谐波，避免设备损坏，保障生产。实际应用中，有时采用有源与无源相结合的方式进行谐波治理，通过 LC 无源滤波抑制某些次含量较高的谐波，可以降低 APF 的容量，有效控制成本。

D-STATCOM 结构原理与 APF 相似，不再详述。其并联在系统中输出无功功率，用以提高配电网功率因数。配电网的负荷多为感性负荷，无功负荷大，功率因数低，而且负荷时有波动，无功补偿情况复杂，安装 D-STATCOM 可以动态补偿无功，提高功率因数。实际应用中，有些场合采用电容器固定补偿与 D-STATCOM 结合进行动态无功补偿[13]，以减小 D-STATCOM 的容量，降低成本；另外，由于 APF 与 D-STATCOM 拓扑结构和控制方法非常相似，也有将两者功能有机结合进行研究，实现谐波、

无功、不平衡等多种情况的综合治理。

UPQC 将串联电压补偿原理和并联电流补偿原理结合在一个装置中，既能补偿电源电压的不对称和谐波，也能补偿非线性负载的不对称和谐波。从某种意义上讲，UPQC 可以看作是 DVR 和 APF、D-STATCOM 的结合体。UPQC 主要由串联和并联 PWM 变流器构成的主电路以及 UPQC 控制电路两部分组成，主电路结构如图 1(c)所示[14]。近年来，有关 UPQC 的技术和实验研究在各国均得到不断加强，并有相近的产品问世。在国内，对于 UPQC 的研究总的来说还处在刚起步的阶段，各高校和科研院所开展了一些研究，相关设备主要还处在实验装置阶段，并取得阶段性成果。UPQC 装置应用于配电网，将实现一定程度的集中控制，可同时解决电网侧和负载侧的多种电能质量问题。

2　电能质量调节装置集散配置策略

配电网中的多种电能质量问题可以利用 DVR、APF、D-STATCOM、UPQC 等先进的电能质量调节装置进行有效处理，本文分析暂不考虑无源方式的滤波和无功补偿方法。根据电能质量调节装置的特点和性能，结合现场的实际工况和电能质量问题分布，进行合理的组合匹配，并通过分析电能质量调节装置的集中/分散配置规律，可以实现电能质量调节装置协调配合、安装位置、容量分配、补偿效果、投资成本等的优化设计。电能质量调节装置集散配置策略首先建立系统优化数学模型，然后分析适用于现场工况的集散配置策略，再通过遗传算法改进集散配置策略，最终实现电能质量调节装置的优化配置。

2.1 数学模型

针对电能质量调节装置的配置问题，是一个多目标优化的问题，不论采取何种策略方式，最终目标通常是在保证系统稳定工作的前提下，达到补偿效果，实现投资成本的最小化。结合电能质量调节装置的性能特点，可以得出电能质量调节装置配置数学模型的目标函数和约束条件。

2.1.1 目标函数

$$f(i,j)_{\mathrm{OF}}=\min\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=0}^{4}(E_{ij}\times V_{ij}\times P_j+C_j)\right) \tag{1}$$

式中：i 代表配网节点；j 代表电能质量调节装置类型(j=0 代表不安装设备，j=1 代表 DVR，j=2 代表 APF，j=3 代表 D-STATCOM，j=4 代表 UPQC)；E_{ij} 代表在节点 i 安装的电能质量调节装置，根据负荷的特点以及初步仿真结果确定节点 i 需要装置具备哪些功能，从而确定调节装置的类型；若节点 i 处安装装置 j，E_{ij} 取 1，否则取 0；V_{ij} 代表节点 i 处安装装置所需的容量，可以根据负荷需求和补偿效果进行初步换算，单位 kVA。P_j 代表装置的单价成本，此处存在 4 种装置 DVR、APF、D-STATCOM、UPQC，则对应有 4 组数据，后续仿真中依次取值 2 500、2 000、1 500、4 000，单位￥/kVA；C_j 代表每台装置的安装等其他附加费用，统一取值 20 000￥。从式(1)可以看出：要想控制生产成本，需要对装置的类型、数量及容量进行优化。

2.1.2 约束条件

在满足电力系统潮流分布正常的情况下，尤其是 DG 并网带来潮流变化的场合，重点针对电能质量调控的指标进行约束。

(1) 满足节点电压质量要求，确保系统稳定。

$$U_{\Delta}=\left|\frac{U_i-U_{\mathrm{R}}}{U_{\mathrm{R}}}\right|\le C_{\mathrm{R}} \tag{2}$$

式中：U_{Δ} 为节点电压变化率；U_i 为节点 i 的电压，U_{R} 为额定电压；C_{R} 为电压变化率限定值；中低压配电网通常取 5%。

(2) 满足电网电流谐波要求，控制电流总谐波畸变率(包括配网入口及特殊负荷入口)。

$$THD_i=\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H}I_{hi}^2}}{I_{1i}}\times 100\%\le C_{\mathrm{THDR}} \tag{3}$$

式中：THD_i 为节点 i 的电流总谐波畸变率；h 为谐波次数；H 为最高谐波次数(根据谐波含量的分布情况确定)；C_{THDR} 为总谐波畸变率限定值，一般取 5%；另外，对于 0.38 kV/6 kV/10 kV 等不同等级下的配网，各次谐波的含量也有明确的国标限值。

(3) 满足配电网的功率因数要求。

$$PF_i=\frac{P_i}{\sqrt{P_i^2+Q_i^2}}\ge C_{\mathrm{PF}} \tag{4}$$

式中：PF_i 为节点 i 的功率因数；C_{PF} 为配电网功率因数限定值，一般取 0.85~0.9。

鉴于实际应用中各装置不会实现理想的完全补偿效果，因而其补偿程度应以满足国标要求为约束。

2.1.3 电能质量调节装置数学模型

四种电能质量调节装置 DVR、APF、D-STATCOM、UPQC 本身的控制策略虽然复杂，但归根到底是具有不同功能的变流器。为便于分析，每种装置在配网中可视为一个单元，其在配网系统中的数学模型可以简化处理，如图 2 所示。

DVR 视为串联变流器，其在电网电压 u_{s} 变化时，输出电压 u_{c}，维持负载电压 u_{L} 稳定。APF 视为并联变流器，其当负载存在谐波时，输出负载电流 i_{L} 中的谐波部分 i_{c}，使电网电流维持正弦基波特性；容量计算时，i_{c} 包含各次谐波，有效值 I_{c} 可由式(5)

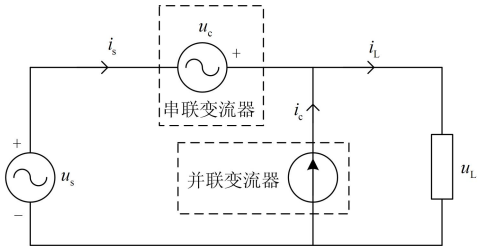

图 2 电能质量调节装置简化模型

Fig. 2 Simplified model of PQRE

求出(其中，h 为谐波次数，H 为最高谐波次数)D-STATCOM 视为并联变流器，当负载存在无功时，输出负载电流 i_L 中的无功部分 i_c，使电网电流 i_s 与电网电压 u_s 逼近同相。UPQC 视为串联变流器和并联变流器同时作用，维持负载电压 u_L 恒定的同时，使 u_s 和 i_s 同相且 i_s 只含基波成分。

$$I_c = \sqrt{\sum_{h=2}^{H} I_h^2} \tag{5}$$

图 2 中向量满足式(6)、式(7)，其中 $\dot{u}_{R1}$ 代表负载上的额定电压基波向量，$\dot{i}_{L1}$ 代表负载中的电流基波向量。

$$\dot{u}_L = \dot{u}_s + \dot{u}_c = \dot{u}_{R1} \tag{6}$$

$$\dot{i}_s = \dot{i}_L - \dot{i}_c = \dot{i}_{L1} \tag{7}$$

2.2 集散配置策略方案分析

建立电能质量调节装置配置的数学模型之后，如何根据现场实际工况选择合适的配置方法至关重要，此处基于功能、装置、投资的不同目的需求，提出了电能质量调节装置的集散配置策略 CDAS。表 1 分析了集散配置策略的方案、方式及特点，主要包括按照功能的集散配置、按照装置的集散配置和按照投资的集散配置。以图 3 所示 IEEE33 节点为架构的配电网节点图进行分析，配置策略和规律基于大量的仿真结果。

按照功能的集中配置是指采用多种功能的装置取代单一功能的装置，如应用 UPQC 代替 DVR 和 APF/D-STATCOM，主要用在同一节点或邻近节点电能质量问题类型较多的场合；分散配置就是根据电能质量问题的侧重点选用需突出改善某一功能的装置，多用于邻近节点存在相同几种电能质量问题的场合。

表 1 集散配置策略实施方案

Table 1 Implementation plan of CDAS

方案	功能	装置	投资
集中配置	设备数量少 控制较简单 成本相对小	改造费用少 所需容量大 效果不理想	取决于现场和 投资环境，改 善效果相对差
分散配置	设备数量多 治理效果好 协调配合难	设备数量多 改造费用大 负荷间影响小	局部改善效果 好，受制于现 场工况环境

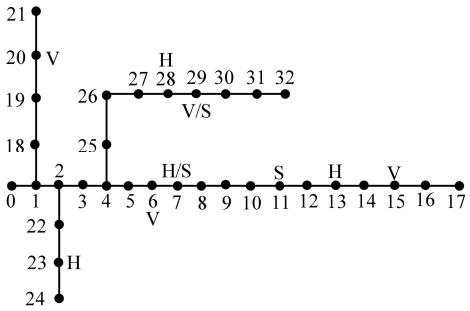

图 3 典型配电网节点图

Fig. 3 Node diagram of typical distribution network

比如图 3 中，节点 5、6、25 都带有谐波负荷和敏感负荷，都需谐波抑制、电压稳定保障，则可选择在节点 4 安装 UPQC 进行集中治理；也可选择在节点 4 安装 DVR，节点 5、6、25 安装 APF 进行分散治理。

按照装置的集散配置是指同一种电能质量调节装置针对多个节点的同一电能质量问题进行的集中/分散配置；或同一节点带多个同一电能质量问题的负荷时，可以在每个负荷就近分散治理，也可在该节点进行集中治理。比如图 3 中，节点 5、6、25 都带有无功负荷，都需进行无功补偿，则可选择在节点 4 安装 D-STATCOM 进行集中治理；也可选择在节点 5、6、25 分别安装 D-STATCOM 进行分散治理。

按照投资的集散配置主要考虑投资成本不足或分期投资时需采取的集散配置策略；还要考虑实际安装地点的现场工况是否便于安装操作，这主要考虑某些负荷位于偏远地区或是现场工况问题，而非单纯技术性原因所致。比如图 3 中，节点 5、6、25 都带有无功负荷，但由于投资有限，可以选择节点 6、25 进行分散补偿；也可选择节点 4 进行集中补偿，但此时补偿容量不足，效果大打折扣。若节点 6 处不便于安装设备，则只能选择节点 5 或者节点 4 进行部分集中补偿。

实际应用中需兼顾各装置的实际补偿能力，比如，DVR 的直流侧能量来源方式(来自储能、电网、分布式电源等)、控制方式(电压幅值控制、电压质量控制、能量最优控制等)直接决定 DVR 的实际补偿能力；不同电压等级与容量的 APF 对补偿谐波次数的影响等。三种不同类型的集散配置策略并非绝对独立，而是相互交叉、补充、配合；同一种集散配置策略中，也可集中、分散相结合，采取局部集中、整体分散的策略，特别是考虑安装位置现场不适合的时候。总之，可以根据实际工况灵活调整集散配置策略，实现集散配置的统一协调。

2.3 基于遗传算法的集散配置策略优化

首先结合现场工况选择合适的集散配置策略方案，确定待定补偿节点；再依据优化配置的目标函

数和约束条件，采用先进的多目标智能优化算法即可实现对配电网电能质量调节装置的二次配置，进一步优化集散配置策略。

2.3.1 智能优化算法

智能优化算法种类繁多，如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、蚁群算法、混沌算法等，其应用范围很广[15-20]。针对优化配置方面的智能算法应用，如文献[15]就以损耗最低为目标提出了灵敏度因子算法和随机算法实现了配网中分布式电源和光伏发电源的优化配置，文献[16]则采用改进混沌优化算法实现了储能系统容量的优化配置。基本的智能优化算法以及改进的优化算法，主要解决寻优的速度和精度的问题。

遗传算法根据决策变量确定编码策略，随机产生初始种群；选择适应度函数，解码初始种群，计算相应适应值；重复进行选择、交叉、变异操作，迭代至产生最优种群[8]。遗传算法应用成熟、优点突出：利于全局择优，易于实现并行化，具有自组织、自适应和自学习性，适应度函数的定义域可任意设定，可以较好地兼顾寻优速度和精度。本文应用遗传算法对配电网电能质量调节装置进行优化配置。

2.3.2 基于遗传算法的优化配置方案

本文遗传算法的决策变量主要源于目标函数，而适应度函数则取决于约束条件，具体应用过程如下。

(1) 编码与解码

此处采用二进制编码，将决策变量装置类型(定义见 2.1.1 节)、装置位置(用配电网的节点表示)、节点电压、无功电流、谐波电流在一定范围内转换成二进制数，如式(8)所示：x_1~x_2 代表装置类型；x_3~x_7 代表装置位置；x_8~x_{15} 代表节点电压；x_{16}~x_{23} 代表无功电流；x_{24}~x_{31} 代表谐波电流。根据约束条件，节点电压波动范围为−5%U_R~+5%U_R；不同电压等级下的各次谐波电流波动范围为 0~国标值；无功电流波动范围为 0~10%I_R(I_R为额定电流或者实际负载电流)。二进制编码的位数取决于优化结果精度的需求，位数越多，数值越精确，但运算次数也越多，运行时间越长。根据二进制数和各变量实际数值的换算关系，可以分别得到各决策变量的数值，用以确定装置类型、位置和容量，也就是对应的解码工作。

$$X=(x_1\sim x_2,x_3\sim x_7,x_8\sim x_{15},x_{16}\sim x_{23},x_{24}\sim x_{31}) \quad (8)$$

编码完成后，可以随机产生一个初始种群。表 2 为容量换算后随机产生的一个种群的例子，表中

表 2 初始种群

Table 2 Initial population

DFACTS 类型	3	4	3	2	1
DFACTS 位置	6	7	15	23	29
DFACTS 容量	0.93	0.86	1.24	0.75	0.56

DFACTS 类型与装置单位成本构成换算关系；DFACTS 容量(单位：Mvar)根据决策变量节点电压、无功电流、谐波电流以及节点导纳矩阵等进行潮流计算决定。

(2) 确立适应度函数

电压、各次谐波电流与无功电流的要求已经融于编码过程中，也就是满足了约束条件的实施，为保证式(3)的约束条件，可以选择电流总谐波畸变率作为适应度函数。通常情况下，适应度函数一般将目标函数映射成求最大值形式且函数值非负。据此，可以采用式(9)作为适应度函数，N 通常取较大的常数，可根据仿真结果适当调整。

$$f_{\text{Fitness}}=N-f(i,j)_{\text{OF}} \quad (9)$$

(3) 选择、交叉、变异

针对表 2 初始种群，结合基于式(9)的适应度函数，将表 2 中涉及的 DFACTS 类型、位置和容量进行选择、交叉、变异操作，数次迭代得出目标函数的最优解，也就是决策变量节点电压、无功电流和谐波电流的实际数值以及 DFACTS 装置的类型和位置，从而得到关于 DFACTS 装置安装类型、位置和容量的一组优化配置解集，实现 DFACTS 装置的优化配置。

本文提出的电能质量调节装置集散配置策略通常在配网系统相对稳定的情况下予以实施，主要针对某个企业、单位内部或者某个区域内的配网，各节点负荷、电能质量问题和配网拓扑变化不大；或者是经过前期的充分调研分析，选择节点负荷、电能质量问题和配网拓扑相对稳定的配网运行状态进行配置。如果配网的电能质量问题变化较大，则需按照恶劣情况进行处理，再对所安装电能质量装置进行统一协调控制，实现实时的补偿效果的优化和投入装置的优化。

3　仿真算例

以 IEEE33 节点配电网为基础(支路阻抗参数保持不变)，构成图 3 所示的配电网结构图，对电能质量调节装置的集散配置策略进行优化分析。图 3 配电网系统中有 32 条支路，电源网络首端基准电压 12.66 kV，三相功率基准值取 10 MVA。设置节点 7、13、23、28 带谐波负荷(图中用 H 表示)，需进行谐波治理；节点 6、15、20、29 带无功负荷(图中用 V 表示)，需进行无功补偿；节点 7、11、29 带敏感负荷(图中用 S 表示)，需保证负荷电压稳定，具体数值详见表 3。此时仿真结果：入口节点 0 的电流总谐波畸变率为 5.79%，配电网功率因数为 0.72；发生电压暂降时，设置节点 7、11、29 处线电压有效值分别降至 8.5 kV，8.2 kV 和 8.0 kV。

从仿真数据可以看出，该配电网存在功率因数低，电压暂降，谐波严重等多种电能质量问题，需要安装电能质量调节装置进行改善。根据集散配置

策略建立的数学模型，此处约束条件限值分别设为敏感负荷电压波动范围 C_R 取 5%；配网入口(节点0)电流谐波总畸变率限值 C_{THDR} 取 5%；功率因数限值 C_{PF} 取 0.9；式(1)目标函数中的 E_{ij} 主要取决于集散配置策略的方式。

表 3 节点负荷容量

Table 3 Load capacity of node

节点	容量/(kW/kvar)	节点	容量/(kW/kvar)	*THD*/%
6	200+j600	7	200+j100	7.34
15	220+j700	13	550+j170	8.85
20	90+j800	23	420+j200	9.41
29	200+j600	28	420+j200	5.39

若采用按照功能的集中配置，则在节点 7、29 采用 UPQC，关于 UPQC 的容量优化配置请参考文献[8]；若采用按照投资的集散配置，则需考虑线路接近末端的节点 15、13 等是否能够安装设备，因地制宜，此处不再详述。以下以按照装置的集散配置为例进行分析，初步选择带谐波负荷、无功负荷、敏感负荷的节点以及上游节点 1、4 作为待定补偿节点，根据 2.3.2 节的基于遗传算法的优化配置策略的步骤进行仿真。

在按照装置的集散配置策略下，采用遗传算法进行智能寻优，本文遗传算法通过 Matlab 软件编程实现，仿真相应参数设置为：交叉概率为 0.8，变异概率为 0.01，每一代种群的规模为 50，迭代次数为 1 000 次。分别对 DVR 单独进行集散配置，对 D-STATCOM 单独进行集散配置，对 DVR、APF 和 D-STATCOM 配合实行集散配置，得到表 4 所示的 3 组配置结果。通过数据分析可以看出以下两点。

(1) DVR 在敏感负荷节点 7、11、29 分散配置时，节点 7、11、29 电压补偿效果易于控制在限值范围之内，总容量也较小；而在节点 4 集中配置时，总容量较大的情况下，节点 7、11、29 电压补偿效果也不太理想。D-STATCOM 在无功负荷节点 6、15、20、29 分散配置时，节点 0 处功率因数可满足 0.9 的要求；在节点 1 集中配置时，也可满足要求，相比分散配置的总容量要大。这与集散配置的特点一致。

(2) DVR、APF 和 D-STATCOM 配合进行集散配置时，节点 7、29 安装 DVR，节点 5 安装 D-STATCOM，节点 4 安装 APF，有装置的集中配置，也有分散配置，有机结合在一起。仿真数据表明，敏感负荷电压得以改善，功率因数达标，DVR 和 D-STATCOM 仿真数据的横向比较发现相应装置总容量降低，降低了成本，具体成本可参照 2.1.1 节中提供的数据进行计算，此处不再赘述。所提配电网电能质量调节装置集散配置策略能够在满足电能质量指标的要求下，实现优化配置。

基于装置的集散配置策略仿真数据如表 4 所示。

表 4 基于装置的集散配置策略仿真数据

Table 4 Simulation data of CDAS based on equipments

装置/*j*	配置策略		仿真数据		
	方案	位置 *i*	节点	效果	总容量 V
DVR/1	分散	7	7	12.91 kV	86.97 kVA
		11	11	12.60 kV	
		29	29	12.28 kV	
	集中	4	7	12.10 kV	98.97 kVA
			11	11.80 kV	
			29	11.98 kV	
D-STATCOM/3	分散	6	0	0.90	3.05 MVA
		15			
		20			
		29			
	集中	1	0	0.90	3.92 MVA
DVR/1	集散	7、29	7	12.36 kV	76.85 kVA
			11	12.05 kV	
			29	12.30 kV	
D-STATCOM/3		5	0	0.90	2.95 MVA
APF/2		4	0	4.61%	0.47 MVA

4 结论

分析配电网各种电能质量问题的特点，结合电能质量调节装置的适用性，提出了配电网电能质量调节装置的集散配置策略，其融合了基于功能、装置、投资的集散配置。依据优化配置数学模型提出的目标函数和约束条件，采用遗传算法对电能质量调节装置进一步进行了优化配置。通过典型配电网的仿真分析表明，有机结合集中、分散配置，统一协调集散配置策略，可以较好地解决电能质量问题的同时，降低投资成本，实现装置配置的优化设计。所提策略可靠有效，具有重要的理论指导和工程应用意义。

参考文献

[1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] 高志远, 姚建国, 曹阳, 等. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.

[3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.

[4] MAHDIANPOOR F M, HOOSHMAND R A, ATAEI M. A new approach to multifunctional dynamic voltage restorer implementation for emergency control in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 882-890.

[5] KHADKIKAR V, CHANDRA A. UPQC-S: a novel concept of simultaneous voltage sag/swell and load reactive power compensations utilizing series inverter of UPQC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (9): 2414- 2425.

[6] MORRIS B, ROBERTO F, ENRICO T. A new proposal for power quality and custom power improvement: OPEN UPQC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2107-2116.

[7] DOMIJAN A, JR MONTENEGRO A, KERI A J F, et al. Custom power devices: an interaction study[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1111-1118.

[8] 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.
FENG Xingtian, WEI Tongzhen, QI Zhiping. Optimal allocation of voltage quality conditioner in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 78-83.

[9] MESSINA A R, BAROCIO E, ARROYO J. Analysis of modal interaction in power systems with FACTS controllers using normal forms[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003.

[10] GHAHREMANI E, KAMWA I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 764-778.

[11] 王建伟, 张庆振, 胡晓光. 基于单周控制逆变算法的动态电压恢复器设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 95-102.
WANG Jianwei, ZHANG Qingzhen, HU Xiaoguang. Dynamic voltage restorer design and implementation based on one-cycle control inverter algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 95-102.

[12] GRABOWSKI D, WALCZAK J. Strategies for optimal allocation and sizing of active power filters[C]. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Greece, Italy, 2012.

[13] 郭三明, 孙鹏荆, 敬树仁, 等. 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88-92.
GUO Sanming, SUN Pengjing, JING Shuren, et al. Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 88-92.

[14] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.

[15] TAYJASANANT T, HENGSRITAWAT V. Comparative evaluation of DG and PV-DG capacity allocation in a distribution system[C] // Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Hong Kong, China, 2012.

[16] 杨珺, 张建成, 桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1209-1216.
YANG Jun, ZHANG Jiancheng, GUI Xun. Capacity optimization of hybrid energy storage system in grid-connected wind and PV power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1209-1216.

[17] 袁佳歆, 赵震, 费雯丽, 等. 基于免疫算法的逆变器多目标 Pareto 最优控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 33-41.
Yuan Jiaxin, Zhao Zhen, Fei Wenli, et al. Pareto Optimum Control of Inverter Based on Multi-objective Immune Algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 33-41.

[18] 刘前进, 许慧铭, 施 超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.

[19] 卢志刚, 赵号, 刘雪迎, 等. 基于可靠度与可观度的量测优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 180-187.
Lu Zhigang, Zhao Hao, Liu Xueying, et al. Optimal Measurement Configuration Based on Degree of Reliability and Observability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 180-187.

[20] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187.
Zhou Chao, Tian Lijun. An Optimum Allocation Method of Voltage Sag Monitoring Nodes Based on Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.

收稿日期：2015-02-28；　修回日期：2015-05-01

作者简介：

冯兴田(1978-)，男，博士，讲师，主要研究方向为电力系统电能质量分析与控制技术；E-mail: topfxt@163. com

孙添添(1991-)，女，硕士研究生，主要研究方向为电能质量改善装置控制策略研究与分析；

马文忠(1968-)，男，博士，教授，主要研究方向为电力电子技术与电机拖动控制、分析与设计。

（编辑　姜新丽）