

配电网串/并联型动态电压恢复器组合优化配置方法

崔婷婷¹, 钟庆¹, 梁怡雪², 汪清³, 王钢¹, 汪隆君¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 广州电力设计院有限公司, 广州 510610;

3. 南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限公司), 广东 深圳 518000)

摘要: 针对电压暂降问题, 串联型和并联型动态电压恢复器 DVR 是目前最为成熟的两种装置。本文提出了一种同时计及串/并联型两种形式的配电网 DVR 组合优化配置方法, 通过综合考虑不同类型 DVR 的特点进行容量选择, 提高了配置方案的经济性和灵活性。首先, 根据串联型 DVR 和并联型 DVR 的工作原理, 分析两种补偿装置的配置需求, 以满足敏感负荷正常运行作为前提, 建立以总投资成本最小为目标的配电网 DVR 组合优化配置模型; 其次, 利用改进的粒子群算法, 对优化配置模型进行求解, 获得最优 DVR 配置方案; 最后, 以某用户供配电系统为实例, 验证了所提串/并联型 DVR 组合优化配置方案的经济性和可行性。

关键词: 电压暂降; DVR; 敏感负荷; 优化配置; 粒子群算法

Collaborative Optimal Configuration Method for Series/Parallel Dynamic Voltage Restorers in Distribution Network

CUI Tingting¹, ZHONG Qing¹, LIANG Yixue², WANG Qing³, WANG Gang¹, WANG Longjun¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangzhou Electric Design Institute, Guangzhou 510610, China; 3. New Smart City

High-quality Power Supply Joint Laboratory, China Southern Power Grid

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd.), Guangdong Shenzhen 518000, China)

Abstract: In view of voltage sag, both series and parallel dynamic voltage restorers (DVRs) are presently the most mature devices. In this paper, a kind of the collaborative optimal configuration scheme of DVR of distribution network considering both series and parallel is proposed, the capacity selection is performed through comprehensively by considering the characteristic of different types of DVR, thus improving both economic performance and flexibility of the scheme. Firstly, the configuration requirement of the two devices are analyzed respectively in accordance with the operating principle of the serial and parallel DVR so to, with meeting the normal operation of the sensitive load as the premise, set up collaborative optimal configuration model of DVR of distribution network with the minimum total investment cost as the target. Then, an improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimal configuration model so to obtain the optimal configuration scheme for DVR. Finally, the power supply system of a certain customer is taken as the real example, the economic performance and feasibility of the proposed series / parallel DVR collaborative optimal configuration scheme is verified.

Keywords: voltage sag; DVR; sensitive loads; optimal configuration; particle swarm optimization

0 引言

近年来,随着电力电子技术的发展,用电设备性能不断提高,使得用户对电能质量的要求越来越

高。而电能质量扰动问题,尤其是电压暂降问题的频发,对设备正常运行造成的影响也日渐突出^[1]。有效解决电压暂降问题,改善和提高供配电系统的电能质量,对缓解电压暂降给用户带来的影响和避

免经济损失具有重要意义。用电侧可安装电压暂降治理设备来抑制或补偿电压暂降,如动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR),不间断电源和静止无功补偿器等^[2-5]。目前,串联型 DVR 和并联型 DVR 是最常见的两种电压暂降治理装置,具有投资成本较低、技术较为成熟的特点,在实际工程中获得了广泛应用^[6]。串联型 DVR 主要通过交流电容或串联变压器向电网注入电压,通过叠加电网电压暂降的残余电压,维持负荷正常运行所需电压^[7-9]。并联型 DVR 在电网发生电压暂降时,迅速切除负载,并产生与电源同频同相的三相电压为负载供电^[10-11]。串联型 DVR 和并联型 DVR 除补偿方式存在差异外,配置成本也会存在差异。另外,DVR 的配置成本也会随配置容量的变化而变化。两种装置具有不同的技术特点和价格,因此通过灵活组合配置,可以提高电压暂降治理方案的技术经济性。

电压暂降治理设备的优化配置一般需同时考虑配置地点及配置容量,通过建立非线性多变量寻优模型进行求解^[12]。对模型求解的方法有数值法、解析法或智能算法等。文献[13]采用拟合得到的单位容量成本曲线反映串联型 DVR 的配置成本随配置容量变化的情形,并采用多种群遗传算法求解出串联型 DVR 优化配置方案;文献[14]将工业用户的电压暂降治理分为园区和设备两部分,分别采用 SSTs 和 DVR 对 10 kV 和 380 V 电压等级侧进行治理;文献[15]则考虑了切换型设备和补偿型设备的配合,获取投资效益最大化的治理方案;文献[16]考虑了 DVR 和 STATCOM 两种治理设备的配合,并将治理设备的投资、损失和运维成本计入总投资中,建立总投资最小的治理设备优化配置模型;文献[17]从用电侧和供电侧综合治理的角度,以供用电双方的总收益最大化为目标,求解经济性最优的电压暂降治理方案。上述研究中一般仅考虑一种类型的 DVR 进行配置,且对 DVR 配置投资成本计算时一般按配置台数或配置容量采用固定单价,不利于不同治理装置和治理模式的组合。因此利用不同 DVR 的技术经济特点进行组合优化配置,有望更进一步提高治理方案的灵活性和技术经济性。

为此,本文提出一种配电网串/并联型 DVR 优化组合配置方法。首先,根据串联型 DVR 和并联型 DVR 的拓扑结构,分别分析两种装置的工作原理,得出了配置需求;然后,计及 DVR 的单价与容量的非线性关系和敏感负荷电压暂降耐受特性,建立以总投资成本最小为目标函数,以满足敏感负荷正常运行约束的 DVR 组合优化配置模型;之后,利用改进的粒子群算法对模型进行求解,求得最终

的组合优化配置方案;最后,利用某实际用户配电网系统作为算例进行分析,并将所得方案与配置单一类型 DVR 的治理方案进行对比,从经济性和治理模式的灵活性上验证所提方法的合理性和有效性。

1 DVR 的配置需求

1.1 串/并联型 DVR 工作原理

1) 串联型 DVR

串联型 DVR 主要由储能单元、逆变电路、滤波器及耦合变压器组成。当控制器检测到电网发生电压暂降时,由逆变器从储能单元中吸收能量,并发出补偿所需的差值交流电压,与电网电压叠加,为负载供电^[18]。串联型 DVR 的等值电路见图 1,可等效为一个串联的受控电压源。

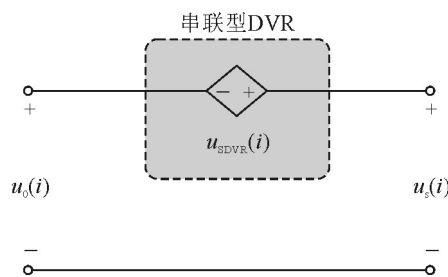


图1 串联型 DVR 等值电路
Fig. 1 Equivalent circuit of series DVR

采用标幺制,假设节点 i 补偿前的电压为 $u_0(i)$,节点 i 配置的串联型 DVR 输出补偿电压为 $u_{SDVR}(i)$,节点 i 补偿后的电压为 $u_s(i)$,串联型 DVR 的工作原理可表示为

$$u_s(i) = u_0(i) + u_{SDVR}(i) \quad (1)$$

2) 并联型 DVR

并联型 DVR 主要由储能单元、逆变电路、滤波器及双向晶闸管组成。当控制器检测到电网发生电压暂降时,系统快速响应,控制晶闸管关断以切断电网与负载的连接,整机进入离网状态后,由储能装置快速输出负载需要的三相对称交流电^[18]。并联型 DVR 的等值电路见图 2,可等效为一并联的受控电压源。

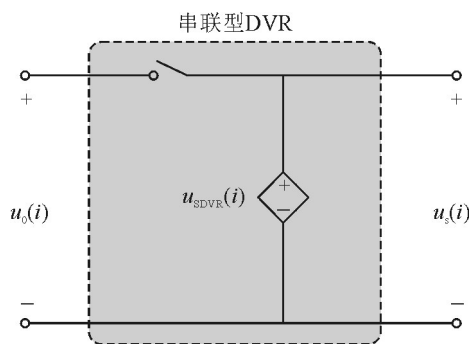


图2 并联型 DVR 等值电路
Fig. 2 Equivalent circuit of parallel DVR

假设节点 i 配置的并联型 DVR 输出补偿电压为 $u_{\text{PDVR}}(i)$, 则并联型 DVR 的工作原理可表示为

$$u_s(i) = u_{\text{PDVR}}(i) \quad (2)$$

综上所述, 串联型 DVR 与并联型 DVR 均可以在毫秒级别快速响应电压波动, 保护敏感负载免受电网电压波动和故障的影响。串联型 DVR 位于电网和敏感负载之间, 作为电网和负载之间的中间设备, 主要响应于负载侧的电压。而并联型 DVR 与电网并联连接, 主要响应于电网侧的电压。

1.2 串/并联型 DVR 配置容量选择

DVR 的配置容量取决于 DVR 输出的补偿电压和负荷容量两个因素^[9]。对于同一个负荷, 分别采用串联型 DVR 和并联型 DVR 进行补偿时, 所需配置的 DVR 安装容量也不同。

对于给定的负荷, 假设节点 i 所接负荷消耗的总功率为 $S_L(i)$, 若采用串联型 DVR 进行补偿, 容量配置需满足在电压暂降期间补偿的负荷需求, 并在可能的情况下提供一定的冗余, 串联型 DVR 的容量配置需求可表示为

$$S_{\text{SDVR}}(i) \geq u_{\text{SDVR}}(i) S_L(i) = [u_s(i) - u_0(i)] S_L(i) \quad (3)$$

式中: $S_{\text{SDVR}}(i)$ 为节点 i 配置的串联型 DVR 所需的安装容量。

若采用并联型 DVR 进行补偿, 根据并联型 DVR 的等效电路, 并联型 DVR 在切断电源与负载的连接后, 输出额定电压为负载供电, 此时, 有 $u_{\text{PDVR}}(i) = 1.0$, 并联型 DVR 的配置需求可表示为

$$S_{\text{PDVR}}(i) \geq u_{\text{PDVR}}(i) S_L(i) = S_L(i) \quad (4)$$

式中: $S_{\text{PDVR}}(i)$ 为节点 i 所配置的并联型 DVR 所需的安装容量。

因此, 对于相同的负荷, 串联型 DVR 和并联型 DVR 的配置需求会根据不同的工作原理和电压补偿方式而有所差异, 但均需要满足负荷需求并留有一定的冗余。

2 串/并联型 DVR 组合优化配置方法

2.1 DVR 组合优化配置数学模型

从用户角度出发, 为充分发挥 DVR 的成本优势, 实现配电网中 DVR 的有效配置, 在保证电压暂降治理效果的前提下, 得到经济性最优的配电网 DVR 配置方案为目标, 建立 DVR 定址定容组合优化配置模型。

假设用户供电系统总节点数为 N , 可供用户选择的不同类型的 DVR 的数目为 m , 建立反映 DVR 安装位置的 $N \times m$ 阶 0-1 矩阵 O , 表达式为

$$O = \begin{bmatrix} o_{11} & \cdots & o_{1m} \\ o_{21} & \cdots & o_{2m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{N1} & \cdots & o_{Nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

O 中的元素 o_{ij} 表示是否在节点 i 配置第 j 种类型的 DVR, 计算公式为

$$o_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 配置第 } j \text{ 种 DVR, } 1 \leq i \leq N \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 未配置第 } j \text{ 种 DVR, } 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (6)$$

为反映 DVR 的配置成本随配置容量变化的特点, 利用 DVR 的单位容量价格函数来反映 DVR 的投资成本^[9]。DVR 的配置容量通常是具体项目的需求和技术要求进行定制的。通过对 DVR 的市场价格进行调研, 可获得离散的 DVR 市场价格, 并利用最小二乘法拟合出 DVR 的单位容量价格函数, 将 DVR 的配置容量转化为连续变量。假设计算得到的第 j 种 DVR 的单位容量价格函数为 $p_j(S)$, 在节点 i 配置的 DVR 的配置容量为 $S_{\text{DVR}}(i)$, 建立反映系统中配置的 DVR 配置成本的 $N \times m$ 阶矩阵 C , 表达式为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & \cdots & c_{Nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中的元素 c_{ij} 表示节点 i 配置的第 j 种类型的 DVR 的成本, 计算公式为

$$c_{ij} = \begin{cases} 0, & o_{ij} = 0 \\ p_j(S_{\text{DVR}}(i)) S_{\text{DVR}}(i), & o_{ij} = 1 \end{cases} \quad 1 \leq i \leq N \quad (8)$$

因此, DVR 优化配置的目标函数为配置方案的总投资费用 E 最小, 可表示为

$$\min E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m c_{ij} \quad (9)$$

DVR 的优化配置需要满足以下约束:

1) 单一选择性约束

从经济与专业角度出发, 对于系统中的每一节点, 能且仅能选择一种 DVR 进行补偿, 因此, 单一选择性约束可表示为

$$\sum_{j=1}^m o_{ij} \leq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

2) DVR 安装容量约束

本文仅考虑串联型 DVR 和并联型 DVR 的配置, 根据串联型 DVR 和并联型 DVR 的配置需求分析, 为满足下游负荷的需要, 对于节点 i 配置的 DVR, 均需满足以下安装容量约束

$$S_{\text{DVR}}(i) \geq u_{\text{DVR}}(i) S_L(i), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中: $S_{\text{DVR}}(i)$ 表示在节点 i 配置的 DVR 的容量; $u_{\text{DVR}}(i)$ 为节点 i 配置的 DVR 的输出补偿电压, 根据

DVR 的配置需求分析,若在节点 i 配置并联型 DVR,有 $u_{\text{DVR}}(i) = 1$;若在节点 i 配置串联型 DVR,有 $u_{\text{DVR}}(i) = u_s(i) - u_0(i)$ 。因此,有

$$\begin{cases} u_{\text{DVR}}(i) = 1, \exists o_{ij} = 1, \text{第} j \text{种为并联型DVR} \\ u_{\text{DVR}}(i) \geq u_s(i) - u_0(i), \exists o_{ij} = 1, \text{第} j \text{种为串联型DVR} \end{cases} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

3) 补偿后电压约束

在配电网中的部分节点安装的 DVR,可对下游节点的电压进行集中补偿。为反映配置的 DVR 在系统中的补偿效果,建立关联矩阵 A ,表达式为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中的元素 a_{ij} 表示在节点 i 安装的 DVR 是否能补偿节点 j 的电压,表达式为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{节点} i \text{安装的DVR能补偿节点} j \text{电压}, 1 \leq i \leq N \\ 0, \text{节点} i \text{安装的DVR不能补偿节点} j \text{电压}, 1 \leq j \leq N \end{cases} \quad (14)$$

建立反映补偿后系统各节点电压的一组 N 维列向量 $U = [u(1), u(2), \dots, u(N)]^T$, U 中元素 $u(j)$ 表示补偿后节点 j 电压,表达式为

$$u(j) = \begin{cases} u_s(i), & a_{ij} = 1 \quad 1 \leq i \leq N \\ u_0(j), & a_{ij} = 0 \quad 1 \leq j \leq N \end{cases} \quad (15)$$

假设系统中接入的敏感负荷数为 T ,根据补偿后系统各节点电压 $u(j)$ 及系统中各敏感负荷所接入的节点情况,建立反映补偿后各敏感负荷电压的一组 T 维列向量 $U_L = [u_L(1), u_L(2), \dots, u_L(T)]^T$, U_L 中元素 $u_L(k)$ 为补偿后第 k 个敏感负荷的电压。

DVR 补偿后需为系统中各接入的敏感负荷提供能使其稳定运行的电压。因此,补偿后敏感负荷电压约束可表示为

$$u_L(k) \geq u_{L,\min}(k), \quad \forall k = 1, 2, \dots, T \quad (16)$$

式中: $u_{L,\min}(k)$ 为第 k 个负荷可以维持正常工作的电压下限。

4) DVR 安装条件约束

并联型 DVR 输出额定电压对电压暂降进行补偿,因此,在配置了并联型 DVR 的节点的下游节点中,无需再配置 DVR 进行治理。假设在节点 i 配置了并联型 DVR,对于节点 j ,若节点 i 安装的 DVR 能补偿节点 j 的电压,即 $a_{ij} = 1$,此时节点 j 无需再配置 DVR 进行治理,有

$$\sum_{k=1}^m o_{jk} = 0 \quad (17)$$

若节点 i 安装的 DVR 不能补偿节点 j 的电压,即 $a_{ij} = 0$,此时仍可在节点 j 配置 DVR 进行治理,有

$$a_{ij} \sum_{k=1}^m o_{jk} = 0 \quad (18)$$

因此,DVR 安装条件约束可表示为

$$\sum_{j=1}^N \left(a_{ij} \sum_{k=1}^m o_{jk} \right) = 0 \quad \exists o_{ij} = 1, \text{第} j \text{种为并联型DVR} \quad (19)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N$$

综上所述,串/并联型 DVR 优化配置模型为

$$\begin{cases} \min E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m c_{ij} \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^m o_{ij} \leq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \\ S_{\text{DVR}}(i) \geq u_{\text{DVR}}(i) S_L(i), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \\ u_L(k) \geq u_{L,\min}(k), \quad \forall k = 1, 2, \dots, T \\ \sum_{j=1}^N \left(a_{ij} \sum_{k=1}^m o_{jk} \right) = 0 \quad \exists o_{ij} = 1, \text{第} j \text{种为并联型DVR} \\ \forall i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (20)$$

2.2 求解方法及流程

DVR 的组合优化配置属于混合整数规划问题,可通过粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)等智能优化算法解决此类问题。为提高 PSO 算法的搜索能力,通常对算法中的惯性权重、学习因子进行改进^[20-21]。另外,DVR 的配置容量选择属于连续变量,类型选择则属于离散变量。因此,为保证 DVR 的定址定容同时进行,本文采用改进的混合粒子群算法对优化配置模型进行求解。

建立由 q 个粒子组成的粒子群,每一粒子位置的前、后半部分分别表示 DVR 的配置类型和输出补偿电压。第 j 个粒子在第 t 次迭代时的位置 x_j^t 为

$$x_j^t = [x_{j1}^t, x_{j2}^t, \dots, x_{j2N}^t], j = 1, 2, \dots, q \quad (21)$$

式中: $x_{ji}^t (i = 1, 2, \dots, N)$ 表示在节点 i 配置的 DVR 的类型,取值如下

$$x_{ji}^t = \begin{cases} 0, & \text{不配置DVR} \\ 1, & \text{配置第} 1 \text{种DVR} \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \vdots & i = 1, 2, \dots, N \\ m, & \text{配置第} m \text{种DVR} \end{cases} \quad (22)$$

$x_{ji}^t (i = N+1, N+2, \dots, 2N)$ 表示在节点 i 配置的 DVR 的输出补偿电压,取值为区间 $(0, 1]$ 上的连续量。

利用改进的混合粒子群算法对配置模型进行求解,求解流程见图 3。

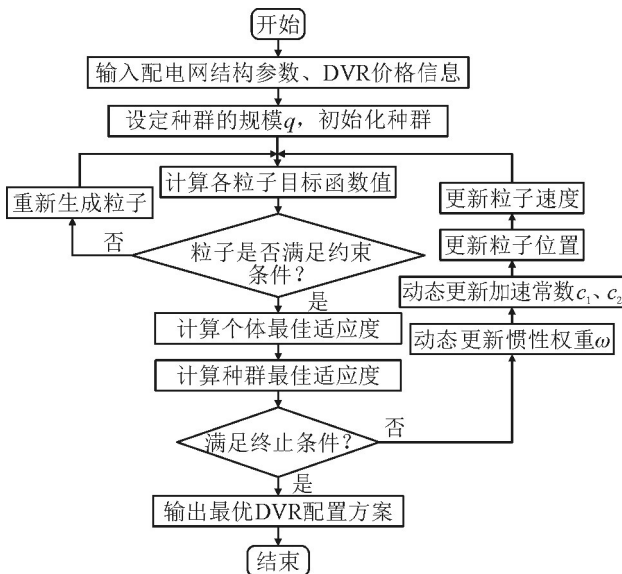


图3 DVR优化配置方案求解流程图
Fig. 3 Flowchart of optimal configuration scheme solution of DVR

3 算例分析

分别采用某实际用户配电网的两个不同的供电区域进行实例分析,其中,该用户配电网两个供电区域所接负荷类型、数目和容量大小存在差异。通过分析两个供电区域的DVR配置方案,验证所提DVR组合优化配置方法的可行性和有效性。

3.1 算例条件

3.1.1 DVR市场价格

本文针对串联型DVR和并联型DVR进行综合配置,因此配置模型中的不同类型的DVR的数目 $m=2$ 。根据市场调研结果,拟合获得串联型DVR和并联型DVR的单位容量价格函数 $p_{SDVR}(S)$ 和 $p_{PDVR}(S)$ 。其中,DVR的配置容量小于15 kVA时,DVR的整机价格视为不变,与15 kVA的DVR价格相等。DVR配置容量大于15 kVA时DVR的单位容量价格函数 $p_{SDVR}(S)$ 、 $p_{PDVR}(S)$ 见图4。

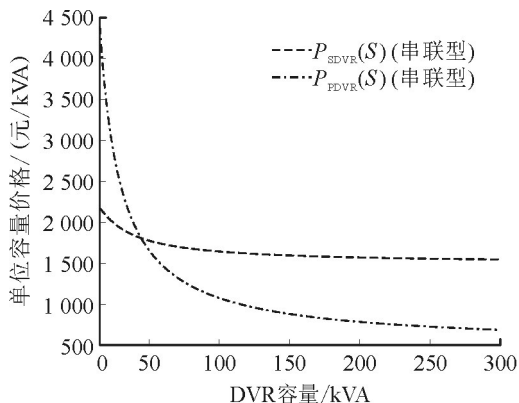


图4 DVR单位容量价格
Fig. 4 The cost per unit capacity of DVR

3.1.2 用户配电网拓扑结构

某用户配电网两个不同的供电区域的拓扑结构见图5,包含2个容量为1 250 kVA,变比为10/0.4 kV的变压器。在所有接入的负荷中,敏感负荷共计20个,其余均为不敏感负荷。将各敏感负荷作为节点进行编号为1~20,并在图上注明各负荷的类型和容量。部分负荷由配电柜连接,将各配电柜编号为a~d,变压器编号为A和B。

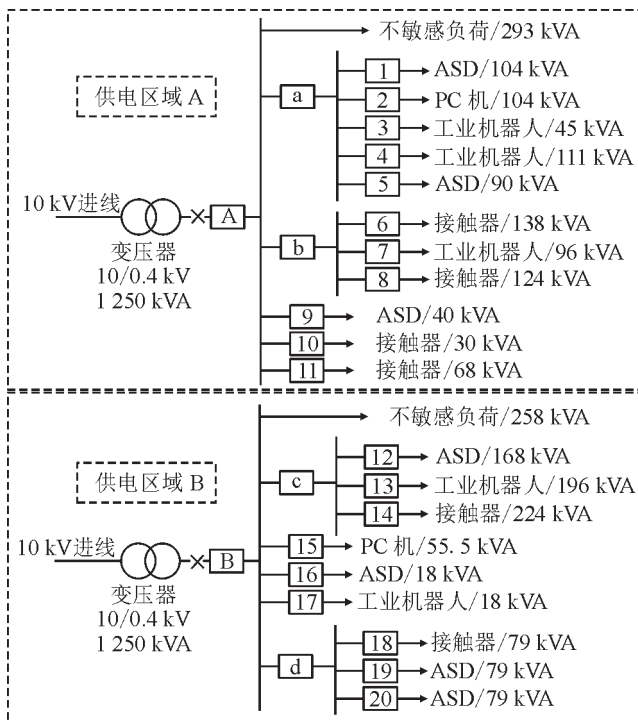


图5 配电网拓扑结构
Fig. 5 Topological structure of power distribution network

3.1.3 敏感负荷供电需求

根据该配电网的拓扑结构,接入配电网中的敏感负荷主要包括ASD、PC机、工业机器人和接触器。由文献[22-25]可获得多种敏感负荷的电压耐受(voltage tolerance curve, VTC)曲线,从而获得上述各敏感负荷的供电需求。本文所研究的DVR整体电压补偿时间较长,能满足电压暂降期间负荷的补偿需求,因此无需计及电压暂降持续时间对敏感负荷的影响,仅需考虑敏感负荷的供电电压需求。各敏感负荷的供电电压需求见表1。

表1 敏感负荷供电电压需求
Table 1 Supply voltage requirements of sensitive loads

敏感负荷类型	供电电压需求/p.u.
ASD	0.70
PC机	0.80
工业机器人	0.85
接触器	0.60

3.1.4 补偿前节点电压

节点补偿前电压是影响串联型 DVR 配置容量,从而影响 DVR 配置成本的重要因素。本文主要分析外部电网故障引入的电压暂降事件,利用来自于上级变电站 10 kV 母线的实际电压暂降监测数据,分别计算获得每次暂降事件各敏感负荷节点处的各相电压特征值。考虑到用户希望完全避免敏感负荷受电压暂降的影响,对配电网中的电压暂降进行充分治理,以节点残余电压幅值 0.1 p.u.作为各敏感负荷节点补偿前的电压,求解该配电网的 DVR 最优配置方案。

3.2 优化配置结果分析

利用本文方法求解得到总投资成本最低的 DVR 组合配置方案。其中,DVR 优化配置模型中的系统总节点数 N 为 26,接入的敏感负荷数 T 为 20。计算得到该配电网的 DVR 最优配置方案,如表 2 所示。DVR 配置位置示意图见图 6。

表 2 DVR 优化配置方案					
Table 2 Optimal configuration scheme of DVR					
供电区域	安装位置	DVR 类型	安装容量/kVA	总安装容量/kVA	总成本/元
A	a	并联型	455	885	661 577.93
	b	并联型	588		
	9	串联型	24		
	10	串联型	15		
	11	串联型	34		
B	c	并联型	588	889	659 994.96
	d	并联型	237		
	15	串联型	39		
	16	串联型	11		
	17	串联型	14		

由表 2 可得,采用串/并联型 DVR 组合配置的方式,配置方案的经济性最优。利用串联型 DVR 补偿的节点主要集中在接入母线的分散的敏感负荷节点,且所需的配置容量较小,更能发挥串联型 DVR 配置容量小时配置价格低的优势。而当一定数目的敏感负荷接入配电柜时,则可在配电柜节点配置并联型 DVR,对其所接的敏感负荷进行集中补偿。由于并联型 DVR 配置容量较大时,单位容量价格低,在配电柜节点安装并联型 DVR 进行集中补偿时,为满足 DVR 的配置容量约束,DVR 的配置容量较大,此时可发挥并联型 DVR 的优势,降低治理方案的投资成本。

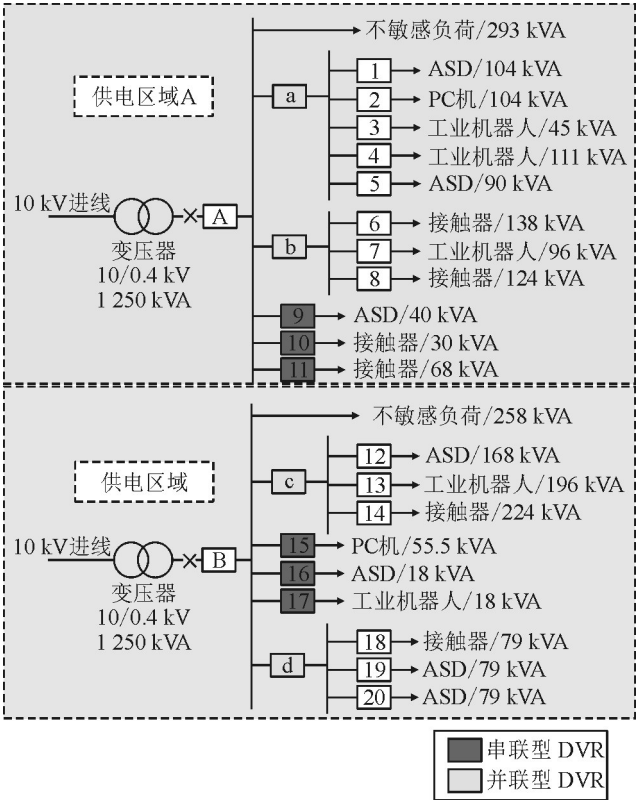


图 6 DVR 配置位置
Fig. 6 Configuration location of DVR

作为对照,分别仅配置单种 DVR 进行电压暂降治理时的投资成本见表 3。可见,仅采用单种 DVR 进行配置时,由于受敏感负荷容量、数目和接入方式等因素的影响,串联型 DVR 和并联型 DVR 各自的价格优势无法充分发挥,导致配置方案的投资成本相对较高。而采用串/并联型 DVR 组合配置的方式,可结合配电网的拓扑结构,合理安排 DVR 的安装位置,在满足治理效果的前提下,有效降低配置方案的投资成本。

表 3 DVR 配置方案对比		
Table 3 Comparison of configuration scheme of DVR		
供电区域	配置方案	总成本/元
A	串/并联型 DVR 组合配置	661 577.93
	仅配置串联型 DVR	1 020 700.69
	仅配置并联型 DVR	670 909.48
B	串/并联型 DVR 组合配置	659 994.96
	仅配置串联型 DVR	962 034.88
	仅配置并联型 DVR	661 790.88

综上所述,本文方法在部分考虑了串/并联型 DVR 的补偿效果、串/并联型 DVR 的价格的基础上,利用寻优算法对 DVR 配置模型进行求解,所得配置方案总投资成本最小。配置单一类型的 DVR 的电压暂降治理方案仅考虑治理方案的可行性,总

投资成本相对较高。本文方法除综合考虑敏感负荷的供电电压需求和分布外,还能充分发挥串联型 DVR 和并联型 DVR 各自的优势,针对配电网的实际情况,制定经济性最优的 DVR 组合配置方案。

4 结语

在敏感负荷接入的用户配电网中,配置 DVR 成为电压暂降治理的主要方式。考虑如何通过当前常用的串/并联型 DVR 的组合配置,使得治理方案经济性更优的问题,本文提出一种 DVR 组合优化配置方法。基于串联型 DVR 和并联型 DVR 的工作原理,以 DVR 配置方案的总投资成本最低为目标,建立配电网 DVR 组合优化配置模型,并采用改进的粒子群算法对模型进行求解。算例结果表明,相较于配置单一类型的 DVR 进行电压暂降的治理,串/并联型 DVR 的组合配置能充分发挥 DVR 各自的价格优势,在满足治理效果的前提下,降低投资成本。

参考文献

- [1] 朱明星,张毅恒,张华赢,等.考虑指标特性的区域电网电能质量评估方法[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(8):150-158.
ZHU Mingxing, ZHANG Yiheng, ZHANG Huaying, et al. Regional power grid quality evaluation method considering index characteristics[J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2022, 34(8): 150-158.
- [2] A. A. DONGRE, Y. P. MISHRA AND A. KUMAR DUBEY. carrier pwm based capacitor supported dynamic voltage restorer for voltage sag and swell mitigation in distribution system[C]//Michael Faraday IET International Summit 2020 (MFIS 2020). Online Conference, 2020: 273-278.
- [3] 张涛,徐雪琴,史苏怡,等.基于改进多种群量子粒子群算法的STATCOM选址及容量优化[J].中国电机工程学报,2015(S1):75-81.
ZHANG Tao, XU Xueqin, SHI Suyi, et al. Optimal location and parameter setting of STATCOM based on improved multiple population quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(S1): 75-81.
- [4] 孟珺遐,蒋利民,谢佳妮,等.考虑用户投资意愿的电压暂降治理设备优化配置[J].电力建设,2021,42(8):55-62.
MENG Junxia, JIANG Limin, XIE Jiani, et al. Optimal configuration of voltage sag mitigation equipment considering user's investment willingness[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 55-62.
- [5] LIU Yang, XIAO Xianrong, ZHANG Xiaoping, et al. Multi-objective optimal STATCOM allocation for voltage sag mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1410-1422.
- [6] 李正明,李文文,张国松,等.一种补偿电网电压凹陷的DVR优化补偿策略[J].电力系统保护与控制,2016,44(17):139-145.
LI Zhengming, LI Wenwen, ZHANG Guosong, et al. An optimized compensation strategy of DVR for grid voltage sag compensation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 139-145.
- [7] 李庆.园区微电网内具备功率调控能力的DVR拓扑与控制关键技术研究[D].长沙:湖南大学,2021.
- [8] NIELSEN J G, BLAABJERG F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1272-1280.
- [9] 孙哲.串联型动态电压恢复器(DVR)新型补偿策略的研究[D].北京:华北电力大学,2010.
- [10] 刘宇峰.并联型动态电压调节器的控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [11] 刘樊明,陈才学,李映,等.中压并联型DVR链式变流器主电路及参数设计[J].电力电子技术,2024,58(3):15-19.
LIU Fanming, CHEN Caixue, LI Ying, et al. Main circuit and parameter design of medium voltage parallel type DVR chain converter[J]. Power Electronics, 2024, 58(3): 15-19.
- [12] 上官海洋,向铁元,张巍,等.基于智能优化算法的FACTS设备多目标优化配置[J].电网技术,2014(8):2193-2199.
SHANGGUAN Haiyang, XIANG Tiejue, ZHANG Wei, et al. Intelligent optimization algorithm based multi-objective optimal configuration for FACTS equipments[J]. Power System Technology, 2014(8): 2193-2199.
- [13] ZHONG Q, HE Q, WANG G, et al. Optimal sizing and placement method for dynamic voltage restorers with mitigation expectation index[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3561-3569.
- [14] 涂春鸣,侯玉超,郭祺,等.面向新能源灵活接入的多功能动态电压恢复器及其优化控制研究[J].电网技术,2021,45(9):3487-3495.
TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Multi-function dynamic voltage restorer and its optimal control for flexibly access of new energy sources[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3487-3495.
- [15] 王建勋,张逸,张嫣,等.面向现代工业园区的电压暂降综合防治方案[J].电力系统自动化,2020,44(14):156-163.
WANG Jianxun, ZHANG Yi, ZHANG Yan, et al. Comprehensive prevention and control scheme for voltage sag in modern industrial park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 156-163.

- [16] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 128-134.
ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 128-134.
- [17] 阚力丰, 李华强, 李春海. 基于供需协调的电压暂降综合治理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 90-95.
KAN Lifeng, LI Huaqiang, LI Chunhai. Comprehensive management strategy for voltage sags based on coordination of supply and demand[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(6): 90-95.
- [18] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
WANG Jing, XU Aiqin, WENG Guoqing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.
- [19] 余小闯. 动态电压恢复器的补偿策略研究与仿真分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [20] X. LI, D. WU, J. HE, et al. An improved method of particle swarm optimization for path planning of mobile robot[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2020(1): 1-12.
- [21] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S K, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [22] POHJANHEIMO P, LEHTONEN M. Equipment sensitivity to voltage sags-test results for contactors, PCs and gas discharge lamps[C]//10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No. 02EX630). [S.l.]: IEEE, 2002: 559-564 vol. 2.
- [23] DJOKIC S Z, STOCKMAN K, MILANOVIC J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [24] XU Yonghai, WU Yafen, ZHANG Mengmeng, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 2-10.
- [25] MUNIZ L M, MANANA M, ZOBAA A F, et al. Portable test platform for evaluating voltage dip immunity of industrial robots and components in the automotive industry[C]//6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). [S. l.]: IET, 2012: 1-4.
- 作者简介:**
崔婷婷(2001—), 女, 硕士研究生, 从事电能质量分析与控制研究。E-mail: c18138879744@163.com。
钟庆(1978—), 男, 通信作者, 教授, 从事电力系统运行分析与控制、电能质量分析与控制等研究。E-mail: epqzhong@scut.edu.cn。
梁恰雪(1999—), 女, 硕士研究生, 从事电能质量分析与控制研究。E-mail: 791562226@qq.com。
汪清(1987—), 女, 高级工程师, 从事电能质量监测与治理技术工作。
王钢(1966—), 男, 教授, 研究方向为电力系统控制与保护、电网规划与可靠性、高压直流输电技术等。E-mail: wanggg@scut.edu.cn。
汪隆君(1982—), 男, 讲师, 研究方向为电力系统可靠性与规划等。E-mail: epwlj@scut.edu.cn。

(上接第97页)

- [23] CUI Shenghui, SUL S K. A comprehensive DC short-circuit fault ride through strategy of hybrid modular multilevel converters (MMCs) for overhead line transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7780-7796.
- [24] J HU K X L, R. ZENG. Analysis and enhanced control of hybrid-MMC-based HVDC systems during asymmetrical DC voltage faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1394-1403.
- [25] Y SONG Y L X B, W. WANG. An improved submodule topology of MMC with fault blocking capability based on reverse-blocking insulated gate bipolar transistor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1559-1568.
- 作者简介:**
耿治(1991—), 讲师, 研究方向为柔性直流输电运行拓扑与控制。E-mail: zhigeng@suda.edu.cn。
肖扬(1992—), 副教授, 研究方向为无线电能传输、特种电源。E-mail: yangxiao@suda.edu.cn。