

DOI: 10.7667/PSPC171297

基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划

郑志宇¹, 李雅倩¹, 谢雪景¹, 郑艳强¹, 张昭丞², 艾芊²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 上海交通大学电气系, 上海 200240)

摘要: 针对传统电压暂降就地治理方案中容量浪费的问题, 提出了一种基于全生命周期成本的治理设备综合配置规划方法。通过建立串、并联型治理设备(以 DVR 和 STATCOM 为例)的数学模型, 基于电压暂降事件的风险评估, 分析比较了串、并联治理设备的治理特点。该方法综合考虑治理方案的投资成本和经济效益, 以经济性最优为目标, 确定电压暂降治理设备的综合配置。采用 IEEE33 节点配电网络进行了仿真验证。仿真结果证明, 当配网内含有多个敏感负荷时, 所提出的综合优化配置方案相对传统的就地治理方案更具经济性。

关键词: 电压暂降; STATCOM; DVR; 全寿命周期成本

Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost

ZHENG Zhiyu¹, LI Yaqian¹, XIE Xuejing¹, ZHENG Yanqiang¹, ZHANG Zhaocheng², AI Qian²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd, Shenzhen 518000, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As the traditional voltage sag mitigation schemes cannot solve the waste problem of mitigation capacity, a new method of allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost is presented in this paper. According to the mathematical model of series and parallel mitigation devices (such as DVR and STATCOM), the differences of mitigation characteristics between those devices are analyzed. Considering the investment cost and economic benefit of the mitigation schemes, allocation plan schemes of voltage sags mitigation devices are obtained. The proposed method has been applied to IEEE 33-bus test system and compared with the traditional mitigation schemes. The results validate its economy and practicality when there are several sensitive loads in the distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577115).

Key words: voltage sags; STATCOM; DVR; life cycle cost

0 引言

近年来, 由于现代工业过程中大量使用电压敏感性设备, 电压暂降已经被视为当前电力系统中最重要的电能质量问题之一, 造成的经济损失巨大^[1-3]。随着国家电改的不断深入, 在以电力市场为主导的新型配电方式下, 电能质量问题将可能使得供电商面临大负荷丢失的危险, 因此解决敏感用户的电能质量问题需要引起重视。

现阶段, 针对敏感用户的电能质量治理措施一般是根据负荷需求进行用户侧就地治理^[4-8], 治理设备的购置多由用户承担, 而且没有形成配电网内的总体规划, 容易导致容量浪费。文献[10]将用户短时

电压需求量化, 对需求相近的工业过程集中补偿, 有效降低了补偿设备的容量, 但将不同企业的工业过程集中补偿实际实施的可行性值得商榷。文献[11]从电网的角度出发, 探讨了考虑电压暂降风险的高压配网无功优化, 在提高电力系统安全可靠性的同时降低了经济成本。文献[12]从技术性的角度, 对补偿设备的配置进行了优化, 大大减少了电网中敏感负荷遭受电压暂降影响的次数。文献[13]针对配网中多台 DVR 配置的问题进行了研究, 但将 DVR 直接串接在配网线路中, 由此造成的可靠性问题需要深入探讨, 而且文章仅考虑治理设备的初始投资成本最小, 没有考虑投资收益, 结果较为片面。实际上, 由于目前治理设备成本较高, 治理方案选择不当的话投资成本可能会高于其经济效益, 其优化布置需要慎重考虑。因此针对提高配电网中敏感负荷

的电压暂降治理效益进行治理设备的配置规划研究具有重要的现实意义。

本文从电网和用户侧角度出发, 建立了 STATCOM 和 DVR 设备在电压暂降治理中的数学模型, 综合考虑规划方案的投资成本与收益, 建立了电压暂降的综合治理规划方案优化模型, 最后采用 IEEE33 节点配电网进行了仿真验证。

1 基于风险理论的电压暂降评估

1.1 电压暂降概率模型

蒙特卡洛方法根据人为设定的概率模型, 对电网进行大量的故障仿真, 当仿真次数足够多时, 能够得到合理的电压暂降概率分布, 是电压暂降评估的常用方法^[14]。用于评估电压暂降的基本随机变量有: 故障线路、故障位置、故障类型和故障切除时间。关于基于蒙特卡洛方法的电压暂降概率模型已有大量文献介绍, 本文不再赘述。

由于仿真次数过多, 蒙特卡洛仿真结果中必然存在大量重复的算例, 若每次都进行暂降计算, 将降低运行效率。本文拟先计算所有故障情况, 构建敏感负荷点故障情况下电压暂降的数据库, 然后由蒙特卡洛算法随机获得故障变量, 直接调用数据库获得结果^[15]。通过统计仿真结果, 可以制作如表 1 所示的电压暂降发生概率表, 表征不同特征电压暂降发生的概率, 结合敏感设备的敏感特性曲线, 可以进一步分析电压暂降的严重程度。其中, 每一行表征电压暂降幅值特征, 而每一列表征持续时间特征。

表 1 电压暂降发生概率表
Table 1 Probability of voltage sags

	<0.1 s	0.1~0.3 s	0.3~0.6 s	>0.6 s
0.8~0.9 p.u.	P11	P12	P31	P41
0.7~0.8 p.u.	P21	P22	P32	P42
0.6~0.7 p.u.	P31	P23	P33	P43
0.5~0.6 p.u.	P41	P24	P34	P44
<0.5 p.u.	P51	P25	P35	P45

其中, P11—P45 分别表示不同电压暂降幅值和电压暂降持续时间的电压暂降事件发生的概率, 其值由历史数据或蒙特卡洛仿真得到。

1.2 基于风险理论的电压暂降经济性评估

风险是人对于概率性事件带来后果的主观反映, 其大小与事件发生概率和造成后果严重程度有关^[16], 是将概率性事件进行量化分析的一种方式。本文将电压暂降风险量化为年损失成本, 具体步骤如下所述。

1) 考核敏感负荷的电压耐受曲线, 如图 1 所示。

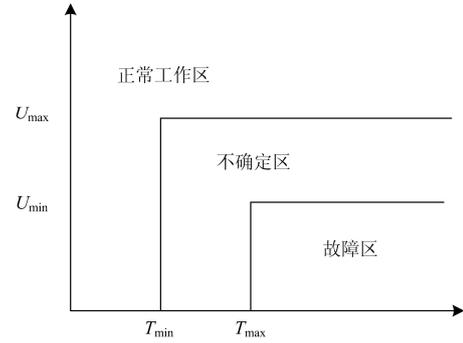


图 1 敏感负荷电压耐受曲线

Fig. 1 Voltage tolerance curve of sensitive load

2) 计算不同特征的电压暂降发生严重程度, 以 Q_{ij} 表示。

$$Q_{ij} = \frac{(U_{\max} - U_{ij})(T_{ij} - T_{\min})}{(U_{\max} - U_{\min})(T_{\max} - T_{\min})} \quad (1)$$

式中, U_{ij} 和 T_{ij} 分别为表 1 中设定的电压区间和时间区间的平均值。

3) 计算年经济损失费用 R_C 。

$$R_C = N \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 P_{ij} E_{ij} \quad (2)$$

式中: N 为年发生电压暂降次数; E 为严重程度代表的质量损失费用, 由式(3)求得。

$$E_{ij} = K(1 - e^{-\frac{Q_{ij}^2}{2\sigma^2}}) \quad (3)$$

式中: K 为最大损失值, 即因电压暂降发生故障造成的损失费用; σ^2 为敏感性参数, 可取为 0.3。

2 电压暂降治理设备模型

2.1 STATCOM 数学模型

STATCOM 为并联型治理设备, 通过注入无功电流实现电压的快速支撑, 相当于一个受控电流源, 不仅可以提高接入点的电压, 还可以有效提高周围节点的电压, 具有全局效益^[17]。STATCOM 接入系统中的数学模型可以由式(4)表示。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix}^{\text{pre}} - \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ I_f \\ I_{sh} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: V_i^{pre} 为节点故障前的电压; Z 为系统的节点阻抗矩阵; I_f 为故障电流; I_{sh} 为 STATCOM 发出的补偿电流。

1) 三相接地短路故障

发生三相接地短路故障时, STATCOM 并环节

点和短路点的电压为

$$V_t = V_t^{\text{pre}} - I_f Z_{ft} + I_{\text{sh}} Z_{tt} \quad (5)$$

$$V_f = V_f^{\text{pre}} - I_f Z_{ff} + I_{\text{sh}} Z_{ft} \quad (6)$$

式中: I_{sh} 为 STATCOM 发出的补偿电流; Z_{ft} 为 STATCOM 并节点与短路点间的互阻抗; Z_{tt} 为 STATCOM 并节点的自阻抗; Z_{ff} 为短路点的自阻抗。

整理易得

$$\begin{pmatrix} I_{\text{sh}} \\ I_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Z_{tt} & Z_{ft} \\ -Z_{ft} & Z_{ff} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_t^{\text{pre}} - V_t \\ V_f^{\text{pre}} - V_f \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, 本文仅考虑金属性接地短路故障, 有 $V_f = 0$ 。

令 $M = \begin{pmatrix} -Z_{tt} & Z_{ft} \\ -Z_{ft} & Z_{ff} \end{pmatrix}^{-1}$, 有

$$I_{\text{sh}} = M_{11} V_t^{\text{pre}} + M_{12} V_f^{\text{pre}} - M_{12} V_t = V_s - k V_t \quad (8)$$

式(8)的向量图如图 2 所示, 其中 α 为 V_t 的相位, β 为 k 的相位。

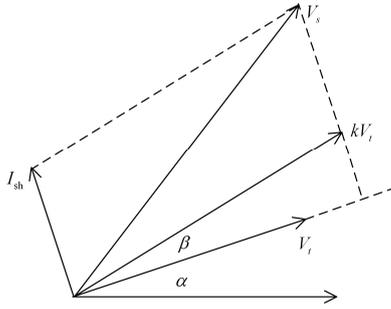


图 2 STATCOM 补偿原理向量图

Fig. 2 Vector diagram of STATCOM compensation principle

由图 2 易得

$$I_{\text{sh}} = -k V_t \sin \beta + \sqrt{V_s^2 - (k V_t \cos \beta)^2} \quad (9)$$

如果 $V_s^2 - (k \cos \beta)^2 < 0$, 则令

$$I_{\text{sh}} = I_{\text{rate}} = S_{\text{STATCOM}} / V_t^{\text{rate}} \quad (10)$$

有

$$V_t = \frac{(-I_{\text{sh}} \sin \beta + \sqrt{V_s^2 - (I_{\text{sh}} \cos \beta)^2})}{k} \quad (11)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{(k V_t)^2 - V_s^2 - I_{\text{sh}}^2}{2 V_s I_{\text{sh}}} + \gamma \quad (12)$$

2) 单相短路故障

对于不对称故障, 需要采用对称分量法进行求解。以 A 相故障为例(以下均选定 A 相为特殊相), STATCOM 并节点和故障点的正序、负序、零序分量分别为

$$V_t^{012} = V_t^{012\text{pre}} - I_f^{012} Z_{ft}^{012} + I_{\text{sh}}^{012} Z_{tt}^{012} \quad (13)$$

$$V_f^{012} = V_f^{012\text{pre}} - I_f^{012} Z_{ff}^{012} + I_{\text{sh}}^{012} Z_{ft}^{012} \quad (14)$$

考虑到单相短路故障发生时的边界条件, 可得

$$\begin{pmatrix} I_{\text{sh}}^1 \\ I_{\text{sh}}^2 \\ I_{\text{sh}}^0 \\ I_f \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} V_t^{\text{pre}} - V_t^1 \\ -V_t^2 \\ -V_t^0 \\ V_f^{\text{pre}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

其中

$$M = \begin{pmatrix} -Z_{tt}^1 & & & Z_{ft}^1 \\ & -Z_{tt}^2 & & Z_{ft}^2 \\ & & -Z_{tt}^0 & Z_{ft}^0 \\ -Z_{ft}^1 & -Z_{ft}^2 & -Z_{ft}^0 & Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2 + Z_{ff}^0 \end{pmatrix}^{-1} \quad (16)$$

有

$$\begin{aligned} I_{\text{sh}}^a &= 3(M_{11} V_t^{\text{pre}} + M_{14} V_f^{\text{pre}}) - M_{11}(V_b + V_c) - \\ &M_{12}(a V_b + a^2 V_c) - M_{13}(a^2 V_b + a V_c) - \\ &a I_b - a^2 I_c - (M_{11} + M_{12} + M_{13}) V_a = \\ &V_s - k V_a \end{aligned} \quad (17)$$

后续计算与三相短路类似, 此处不再赘述。

3) 两相短路接地故障

对于两相短路接地故障, 与单相短路故障类似, 依据短路边界条件进行计算。

4) 两相短路故障

对于两相短路故障, 由于不含零序分量, 有

$$V_t^{12} = V_t^{12\text{pre}} - I_f^{12} Z_{ft}^{12} + I_{\text{sh}}^{12} Z_{tt}^{12} \quad (18)$$

$$V_f^{12} = V_f^{12\text{pre}} - I_f^{12} Z_{ff}^{12} + I_{\text{sh}}^{12} Z_{ft}^{12} \quad (19)$$

通过边界条件即可计算出敏感负荷所在节点的电压情况。

2.2 DVR 数学模型

DVR 为串联型设备, 只能补偿串接节点的下游节点电压, 一般只装设在用户进线处。补偿后的电压可由式(20)求得

$$V_t = V_{\text{sag}} + V_{\text{DVR}} \quad (20)$$

式中: V_t 表示 DVR 补偿后的电压暂降幅值; V_{sag} 表示 DVR 补偿前的电压暂降幅值; V_{DVR} 表示 DVR 的补偿电压。

DVR 的补偿策略包括同相补偿、完全补偿和最小能量补偿, 本文主要采用同相补偿, 即 V_{sag} 和 V_{DVR} 同相位。

2.3 基于全寿命周期成本的经济性模型

电压暂降的治理经济性分析主要包括: 设备的初始投资成本、安装后的暂降损失成本、以及运行过程中产生的运维成本。

初始投入成本是一次性的成本, 考虑到资金的时间价值, 运行成本、维护成本需要进行折算处理。本项目采用折算为现值的方法进行比较, 折算公式为

$$C = C_I + \sum_{t=0}^n \frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t} (C_{O_t} + C_{M_t}) + \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} C_D \quad (21)$$

式中: r 为折现率; n 为工程寿命周期; t 为年份。

3 电压暂降治理效果分析

基于上节建立的电压暂降治理设备模型, 本节拟对 STATCOM 和 DVR 在电压暂降中的治理效果进行比较。

针对 IEEE33 节点配电网系统, 假设 BUS10 发生三相短路故障, 治理设备接于 BUS6, BUS6 所接负荷为 $200 \text{ kW} + j100 \text{ kvar}$ 。图 3 和图 4 分别为接入 STATCOM 和 DVR 后的系统电压水平。由图 3 和图 4 可知, 对于电压暂降问题, 采用用户侧接入 DVR 进行补偿所需容量远小于接入 STATCOM 所需容量, 这也是当前广泛采用的电压暂降治理方案。

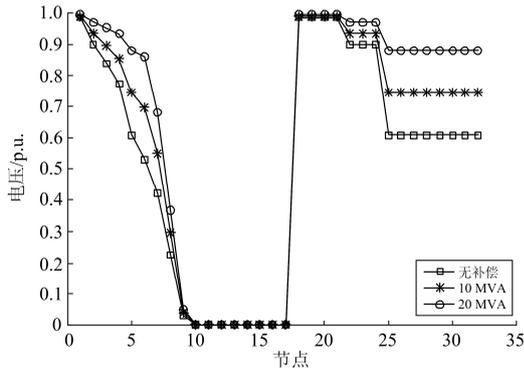


图 3 STATCOM 补偿效果

Fig. 3 Voltage sag mitigation with STATCOM

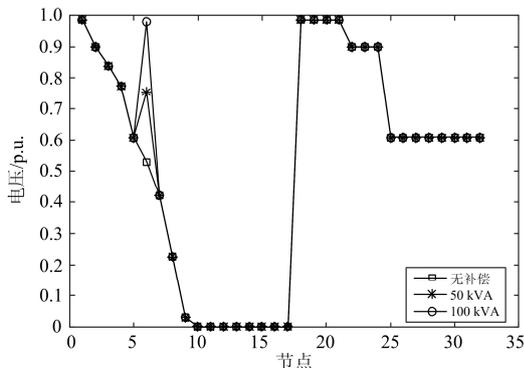


图 4 DVR 补偿效果

Fig. 4 Voltage sag mitigation with DVR

从经济性角度研究, 当前 DVR 和 STATCOM 的市场价分别为 1.25 万元/kVA ^[13]和 200 元/kVA ^[18](含

设备安装费)。维护成本一般为初始投资成本的 5%~10%, 考虑到 DVR 为串联设备, 其可靠性要求较高, 因此选取维护成本为初始成本的 10%, 而 STATCOM 为并联设备, 取为 5%。设备使用寿命均为 20 年, 折现率为 5%。

表 2 为节点 6 分别装设 DVR 和 STATCOM 的治理效果对比, 其中 DVR 选用 100 kVA, 而 STATCOM 选用 10 MVA。其中, LCC 成本为治理方案的全生命周期成本, 主要包括治理设备的初始投资成本、运行维护成本以及寿命期内电压暂降损失成本, 其计算公式如式(21)所示。可以看出, STATCOM 和 DVR 均可以有效降低敏感用户的全生命周期成本损失。尽管 DVR 单位容量成本远高于 STATCOM, 且维护费用较高, 但在治理过程中需要的容量小于 STATCOM 所需容量, 因此, 无论从初始投资还是全生命周期成本的角度, DVR 都是较优的选择。

表 2 DVR 和 STATCOM 补偿效果对比

Table 2 Difference between voltage sag mitigation with DVR and STATCOM

设备	初始投资/万元	LCC 成本/万元
STATCOM	205	11 967
DVR	128	7 250
无设备	0	17 444

值得注意的是, 作为并联型补偿设备, 由 STATCOM 发出的补偿电流会对其局部或全局电压支持具有一定的价值。因此当配网中含有多个邻近敏感用户的时候, 进行配网内的治理方案总体规划就需要考虑 STATCOM 的全局价值。

4 配电网电压暂降治理设备优化配置模型

4.1 模型建立

由于电压暂降发生时间短, 治理设备投入切除的时间也极短, 因此本文不考虑电压暂降补偿过程中对电压稳定性和谐波的影响, 只针对经济性因素进行考虑。

目标函数为

$$\min f = C_{\text{ini}} + \sum_{t=1}^n \frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t} (R_C + C_m) \quad (22)$$

式中: C_{ini} 为设备初始投资成本; C_m 为每年维护成本; r 为折现率; n 为设备使用寿命; R_C 为补偿后每年电压暂降损失成本, 其计算方法与补偿前计算方法类似, 详见 1.2 节内容, 本节不再赘述。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)最早是由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出, 它的基本概念源于对鸟群觅食行为的研究^[19]。粒子群

算法认为每一个粒子代表着目标函数的一个可能的解。粒子的位置定义为

$$x_i = [P_1, P_2, \dots, P_M] \quad (23)$$

$$P_i = [t_i, s_i] \quad (24)$$

式中： x_i 为粒子群中第 i 个粒子的位置， $P_i (i=1, 2, \dots, M)$ 为第 i 个解的参数向量； t_i 为配置设备的类型 ($i=0$ 表示无设备， $i=1$ 表示 STATCOM， $i=2$ 表示 DVR)； s_i 为配置设备的容量。

粒子的速度和位置在每次迭代之后都会更新，粒子的速度和位置更新公式为

$$v_i(t) = w_i v_i(t-1) + c_1 r_1 [x_{i,best} - x_i(t)] + c_2 r_2 [x_{g,best} - x_i(t)] \quad (25)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (26)$$

式中： $v_i(t)$ 为第 i 个粒子在第 t 次迭代时的速度； w_i 表示在第 t 次迭代时的惯性权重； c_1 、 c_2 分别为个体和群体加速度因子； r_1 、 r_2 是分布在 $[0,1]$ 区间的随机数； $x_{i,best}$ 表示第 i 个粒子的个体历史最优位置； $x_{g,best}$ 表示粒子群中所有粒子的历史最优位置。

通常 PSO 算法适应于连续搜索空间进行，在离散空间不能直接加以应用^[20-21]，而本文建立的优化模型中补偿装置的类型变量为离散变量，为了使 PSO 算法能解决离散变量问题，本文对 PSO 算法进行了适当的改进，即选用一个 $[0,3)$ 区间上的连续变量代替离散变量，再映射至 $\{0,1,2\}$ 。算法的流程图如图 5 所示。

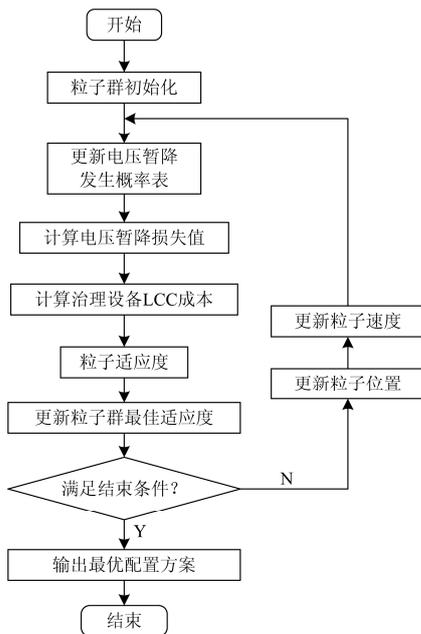


图 5 配置算法流程图

Fig. 5 Allocation plan algorithm flow chart

4.2 结果分析

以 IEEE33 节点配电网为研究对象，系统结构图如图 6 所示，敏感负荷接入点在 6、23、24、29 和 31 号节点。为方便计算，本文假设敏感负荷特性均相同，即 $U_{min} = 0.6$ ； $U_{max} = 0.9$ ； $T_{min} = 20$ ； $T_{max} = 300$ ，不同的敏感特性也同样适用。假设平均单次电压暂降损失成本与负荷大小有关，令节点 6 接入的敏感负荷单次电压暂降损失为 20 万元，则节点 23、24、29、31 号节点所接负荷单次电压暂降损失分别为 42 万元、42 万元、20 万元和 21 万元。

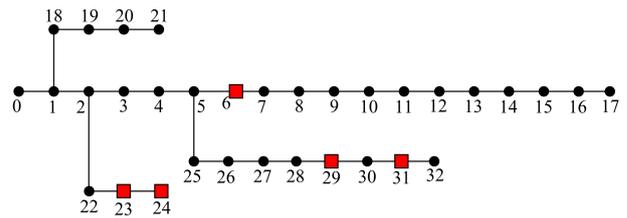


图 6 IEEE33 节点系统

Fig. 6 IEEE33 distribution network

采用蒙特卡洛模拟仿真，通过统计仿真结果，可以制作各敏感负荷的电压暂降发生概率表，表 3 为 23 号节点所接负荷的电压暂降发生概率表。

表 3 23 号节点电压暂降发生概率表

Table 3 Probability of voltage sag of bus 23

	<0.1 s	0.1~0.3 s	0.3~0.6 s	>0.6 s
0.8~0.9 p.u.	0.010 4	0.052 2	0.084 5	0.027 8
0.7~0.8 p.u.	0.006 2	0.025 3	0.049 3	0.014 3
0.6~0.7 p.u.	0.003 4	0.018 9	0.027 6	0.010 5
0.5~0.6 p.u.	0.001 1	0.009 9	0.013 7	0.008 6
<0.5 p.u.	0.018 9	0.086 3	0.153 2	0.044 2

基于全生命周期成本分析，以治理成本最小为优化目标，得到的优化配置结果如表 4 所示，总投资成本为 47 917 万元。

表 4 本文提出的电压暂降治理方案

Table 4 Voltage sag mitigation scheme presented in this paper

节点	类型	配置容量
3	STATCOM	22 MVA
6	DVR	120 kVA
28	STATCOM	9 MVA

作为对照，考虑传统的电压暂降就地治理方案，即分别在敏感负荷接入节点单独配置 DVR。基于 LCC 成本，以投资效益成本最优为目标，配置方案总的配置容量为 453 kVA，投资成本为 26 082 万元，如表 5 所示。

本文提出的综合治理方案和传统的就地治理方案对比分析如表 6 所示。

表 5 电压暂降就地治理方案

Table 5 Traditional voltage sag mitigation scheme with DVR

节点	配置容量/kVA
6	160
23	86
24	67
29	170
31	130

表 6 电压暂降治理方案对比

Table 6 Difference between voltage sag mitigation schemes

方案	LCC 成本/万元
无补偿	77 826
就地治理	52 273
本文方案	47 917

由该算例可证明,相对于传统的就地治理方案,本文提出的优化配置方案能够有效降低投资成本。

实际上,随着工业自动化等敏感设备的不断普及,配网中敏感负荷占据的比例会越来越重,考虑到 STATCOM 具有快速无功补偿和局部电压支持能力,在未来配网电压暂降综合治理配置中 STATCOM 和 DVR 的配合将具有更广阔的应用空间。

5 结论

随着配网中敏感负荷的不断增多,传统的就地治理方案容易造成补偿容量的浪费,需要从配网整体的角度优化配置。本文基于全寿命周期成本建立了电压暂降综合治理优化配置模型,并采用粒子群算法进行了求解。算例结果表明,当配网内含多个敏感负荷时,本文提出的优化配置方案相对就地治理方案更具经济性。

值得注意的是,本文建立的优化模型将供电方和用户视为一个利益共同体,即模型中的投资和暂降损失均由该共同体承担。实际上,补偿设备的投资和电压暂降的损失可能存在多个主体,各主体间的利益诉求也不尽相同,这种情况增加了模型的复杂程度,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 林海雪. 电力系统中电压暂降和短时断电[J]. 供用电, 2002, 19(1): 9-11.
LIN Haixue. Voltage dip and short supply interruption in power systems[J]. Distribution & Utilization, 2012, 19(1): 9-11.
- [2] 周明, 张彪, 李庚银, 等. 基于质量工程理论的电压暂降经济评估[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 152-158.
ZHOU Ming, ZHANG Biao, LI Gengyin, et al. Economic
- assessment of voltage sags based on quality engineering theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 152-158.
- [3] 徐永海, 陶顺, 肖湘宁. 电网中电压暂降和短时间中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [4] 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.
- [5] JAFARI M, NADERI S B, HAGH M T, et al. Voltage sag compensation of point of common coupling (PCC) using fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2638-2646.
- [6] HAQUE M H. Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM[C] // Power Tech Proceedings, September 10-13, 2001, Porto: 5.
- [7] 黄永红, 徐俊俊, 孙玉坤. 基于最小能量补偿控制的微网动态电压恢复器[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 128-136.
HUANG Yonghong, XU Junjun, SUN Yukun. Dynamic voltage restorer in micro-grid based on a minimum energy compensation control scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 128-136.
- [8] 冯兴田, 孙添添, 马文忠. 一种基于智能改进算法的定制电力设备优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 16-21.
FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong. Optimal configuration strategy of custom power devices based on intelligent improved algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 16-21.
- [9] 宋旭东, 向铁元. 基于完全电压补偿法的 SMES 用于抑制电压暂降的参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 62-67.
SONG Xudong, XIANG Tiejuan. Parameters design of the SMES for suppressing voltage sag based on complete voltage compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 62-67.
- [10] 刘阳, 肖先勇, 刘旭娜, 等. 考虑用户定量需求的优质电力园区 DVR 优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 823-828.
LIU Yang, XIAO Xianyong, LIU Xuna, et al. Optimal configuration of DVR in premium power park considering customers' quantitative demand[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 823-828.
- [11] 李剑辉, 曹阳, 辛拓, 等. 考虑电压暂降风险的高压配

- 网动态无功容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 47-53.
- LI Jianhui, CAO Yang, XIN Tuo, et al. Study on high voltage distribution network dynamic optimal allocation of reactive power capacity considering the risk of voltage sag[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 47-53.
- [12] ZHANG Y, MILANOVIĆ J V. Global voltage sag mitigation with facts-based devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2842-2850.
- [13] 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.
- SHENG Xiaoguang, WEI Tongzhen, MA Ming, et al. Optimal configuration of multiple DVRs in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2991-2996.
- [14] 曾江, 蔡东阳. 基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1469-1475.
- ZENG Jiang, CAI Dongyang. A Mont Carlo assessment method of voltage sags based on combination weight[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1469-1475.
- [15] 易杨, 张尧, 钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 57-60.
- YI Yang, ZHANG Yao, ZHONG Qing. Assessment of voltage sags in large power consumer based on Monte Carlo method[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 57-60.
- [16] 戴剑锋, 周双喜, 鲁宗相, 等. 基于风险的电力系统无功优化问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 38-43.
- DAI Jianfeng, ZHOU Shuangxi, LU Zongxiang, et al. Study on reactive power optimization based upon risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 38-43.
- [17] MILANOVIĆ J V, ZHANG Y. Modeling of FACTS devices for voltage sag mitigation studies in large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 3044-3052.
- [18] 赵渊, 董力, 谢开贵. FACTS 元件的可靠性成本/效益分析及其优化配置模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 107-114.
- ZHAO Yuan, DONG Li, XIE Kaigui. Research on optimal placement of FACTS devices based on reliability cost/benefits analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 107-114.
- [19] 张经纬, 归一数, 康英伟, 等. 基于改进粒子群算法的锅炉再热蒸汽温度模型辨识[J]. 热力发电, 2017, 46(7): 72-78.
- ZHANG Jingwei, GUI Yishu, KANG Yingwei, et al. Identification of boiler reheat steam temperature model based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7): 72-78.
- [20] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 57-63.
- ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 57-63.
- [21] 仲亚飞, 韦红旗, 姚卫刚, 等. 基于粒子群算法和支持向量机的锅炉排烟温度建模[J]. 热力发电, 2016, 45(1): 32-36.
- ZHONG Yafei, WEI Hongqi, YAO Weigang, et al. Boiler exhaust gas temperature modeling based on particle swarm algorithm and support vector machine[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(1): 32-36.

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-11-24

作者简介:

郑志宇(1969—), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 13802283691@139.com

李雅倩(1982—), 女, 大学本科, 工程师, 研究方向为电力系统配电网规划; E-mail: 77948911@qq.com

谢雪景(1987—), 女, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向为电力系统规划。E-mail: lovelybabykabby@163.com

(编辑 周金梅)