

计及时序特性的主动配电网无功电源规划

符 杨¹, 缪润利², 李振坤¹, 张代红³, 金山红³

(1. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力公司温州供电公司, 浙江 温州 325000;
3. 国网浙江省电力公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 主动配电网集成了丰富的可控资源, 而当前配电网的无功电源规划并没有考虑主动管理手段, 导致无功电源优化配置难以反映全面的综合性效益。针对此状况, 考虑分布式电源、变压器分接头、储能、负荷调整等主动管理手段, 计及主动配电网的时序特性, 建立两层规划模型, 在规划中考虑运行特性对电容器进行了综合优化配置, 规划层考虑电容器的投资维护费用, 运行层计及配电网的年运行费用, 并采用基于小生境的遗传算法对两层规划模型进行优化求解。算例结果表明: 在电容器规划中考虑主动管理手段, 有利于提高资源利用率、降低配电网的投资和运行费用; 充分利用分布式电源和储能的无功调节能力有利于配电网的安全经济运行。

关键词: 主动配电网; 主动管理手段; 可控资源; 两层规划; 时序特性; 电容器

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.002

0 引言

配电网无功电源规划是降低配电网网络损耗、改善配电网电压水平和实现无功就地平衡的重要手段。10kV 配电系统的无功补偿以变电站集中补偿为主, 随着配电网网架的不断增大和负荷需求的日益提高, 通过长距离传输无功功率, 会引起馈线较大的线路损耗, 且容易导致线路阻塞、线路末端电压偏低等问题^[1]。间歇性分布式电源 DG (Distributed Generation) 接入配电网之后, 虽然可能缓解上述问题, 但间歇性 DG 出力受环境影响较大, 具有随机性和波动性, 会影响配电网的稳定与运行^[2-3]。在智能配电网技术路线发展的过程中, 主动配电网 ADN (Active Distribution Network) 的出现, 正是解决 DG 和配电网发展需求的关键技术。主动配电网是具备组合控制各种分布式资源能力的配电网络, 是能够实现 DG 广泛接入配电网的重要技术手段^[4]。主动配电网技术赋予了无功电源规划一些新的内容, 主动配电网的核心是主动管理, 而无功电源又是主动管理的一种手段, 合理配置的无功电源与其他主动管理手段相互配合, 对配电网的安全经济运行有极大的作用。

目前国内外学者对配电网无功电源规划的相关内容进行了研究, 并且取得一定的研究成果^[5-13]。在传统配电网方面, 文献^[5-6]以无功补偿后的年费用最小为目标函数建立了无功电源规划模型, 并采用遗传算法进行求解; 文献^[7]考虑了在多个负荷水平下求解无功电源规划问题。在有源配电网方面, 文献^[8]计及 DG 的有功出力分别以网损费用最小和无功补偿设备投资最小为目标建立了多目标无功电源规划模型, 并采用基于 Pareto 前沿解的非支配排序

遗传算法进行求解, 研究表明 DG 不仅能输出有功功率, 还能为电网提供一定的无功支撑^[9-10]; 文献^[11-12]在考虑 DG 无功特性的基础上研究了配电网的无功电源规划问题; 文献^[13]针对广义电源的配置问题, 充分考虑了 DG 的间歇性和随机性, 在规划期间计及了运行效益, 建立了两层规划模型。

主动配电网在满足电力用户负荷需求的同时, 能够主动对网络拓扑、并网 DG、储能、有载调压变压器、无功补偿等设备进行综合优化调度, 以达到灵活控制无功电压运行水平、降低网络电能损耗的目的, 但会对主动配电网的无功特性造成一定的影响。文献^[14]分别阐述了 DG、网络拓扑、需求侧响应对主动配电网无功电压特性的影响, 指出主动配电网与传统配电网在运行特性上的显著差别; 文献^[15]将储能引入主动配电网中, 建立了考虑主动管理的储能系统选址、定容模型, 并比较分析了最优化储能选址定容的效益; 文献^[16]考虑电容器、有载调压变压器、DG 无功调节和网络重构的主动管理措施对配电网进行了无功优化, 并分析了主动管理手段的优先顺序对无功优化结果的影响。

上述研究虽然从不同的角度研究了配电网优化规划的相关问题, 但仍然存在优化规划时考虑因素单一而难以全面反映其综合效益与影响, 并且难以准确体现间歇性 DG 和负荷的特性。本文建立风力发电、光伏发电和负荷的时序模型, 综合考虑电容器、变压器分接头、风光无功出力、储能无功出力、负荷调整的主动管理手段, 建立了主动配电网无功电源规划的两层规划模型, 规划层为电容器的配置, 运行层计及主动管理手段进行整体优化, 采用基于小生境的遗传算法进行求解, 最后通过算例分析, 验证所提模型和方法的优越性, 并给出最佳的规划方案。

1 主动配电网元件时序模型

主动配电网元件中,本文主要考虑风力发电机、光伏电池、储能和可调整负荷作为变压器分接头和无功电源的辅助手段主动参与配电网电压控制。元件建模的不同对无功电源规划有较大的影响,间歇性 DG 具有较大的不确定性,储能的运行状态具有时间耦合性,电力负荷的波动在全天具有一定的规律性,因此本文采用时序模型准确地描绘主动配电网的特性。

1.1 风力发电机时序模型

双馈风力发电机的有功功率输出与风速大小有关,具有间歇性和时序性,其有功出力时序模型可用如下分段函数表示:

$$P_{WT,t} = \begin{cases} 0 & v_t \leq v_{ci}, v_t \geq v_{co} \\ k_1 v_t + k_2 & v_{ci} < v_t < v_r \\ P_{WT,r} & v_r \leq v_t < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{WT,r}$ 为风力发电机的额定有功功率;参数 $k_1 = v_r / (v_r - v_{ci})$;参数 $k_2 = -k_1 v_{ci}$; v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速。

双馈风力发电机输出或吸收的无功功率由定子侧和网侧变换器的无功功率组成。双馈风力发电机定子侧 t 时段输出或吸收的无功功率极限为^[10]:

$$\begin{cases} Q_{\max,t} = -\frac{3U_{s,t}^2}{X_s} + \sqrt{\frac{9U_{s,t}^2 X_m^2 I_{\max,t}^2}{X_s^2} - P_{s,t}^2} \\ Q_{\min,t} = -\frac{3U_{s,t}^2}{X_s} - \sqrt{\frac{9U_{s,t}^2 X_m^2 I_{\max,t}^2}{X_s^2} - P_{s,t}^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Q_{\max,t}$ 和 $Q_{\min,t}$ 分别为 t 时段风力发电机定子侧的最大和最小无功功率; $P_{s,t}$ 为 t 时段风力发电机定子侧的有功功率; $U_{s,t}$ 为 t 时段风力发电机定子侧节点电压; X_m 和 X_s 分别为风力发电机的转子电抗和定子电抗; $I_{\max,t}$ 为 t 时段的最大转子电流。

双馈风力发电机网侧变换器 t 时段输出或吸收的无功功率极限为:

$$\begin{cases} Q_{g\max,t} = \sqrt{S_{g\max}^2 - (s_t P_{s,t})^2} \\ Q_{g\min,t} = -\sqrt{S_{g\max}^2 - (s_t P_{s,t})^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $Q_{g\max,t}$ 和 $Q_{g\min,t}$ 分别为 t 时段风力发电机网侧变换器的最大和最小无功功率; $S_{g\max}$ 为网侧变换器的容量; s_t 为 t 时段风力发电机的转差。

因此,双馈风力发电机输出或吸收的无功功率极限为:

$$\begin{cases} Q_{WT\max,t} = Q_{\max,t} + Q_{g\max,t} \\ Q_{WT\min,t} = Q_{\min,t} + Q_{g\min,t} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 光伏电池时序模型

光伏电池的有功功率输出与光照强度有关,其 t 时段输出的有功功率 $P_{PV,t}$ 的计算式可以简化为:

$$P_{PV,t} = r_t A \eta \quad (5)$$

其中, r_t 为 t 时段的光照强度; A 为光伏阵列总面积;

η 为光电转化效率。

光伏电池经由逆变器接入配电网输出有功功率时,可利用逆变器的复用技术产生无功功率^[12],其 t 时段输出或吸收的无功功率最大值为:

$$Q_{PV\max,t} = \sqrt{S_{PV}^2 - P_{PV,t}^2} \quad (6)$$

其中, $Q_{PV\max,t}$ 为 t 时段光伏电池输出或吸收无功功率的最大值; S_{PV} 为光伏电池逆变器容量; $P_{PV,t}$ 为 t 时段光伏电池输出的有功功率。

1.3 储能时序模型

储能是一种可灵活充放电的可控电源,是主动配电网的核心元件之一。储能经由逆变器接入配电网输出有功功率时,可利用逆变器的复用技术产生无功功率。本文的储能装置选取蓄电池,其时序模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} E_{t+1} = (1-\rho)E_t - \Delta E_t \\ \Delta E_t = \begin{cases} P_{ess,t} \eta_{in} \Delta t & P_{ess,t} > 0 \\ P_{ess,t} \Delta t / \eta_{out} & P_{ess,t} \leq 0 \end{cases} \\ Q_{ess,t,\max} = \sqrt{S_{ess}^2 - P_{ess,t}^2} \end{cases} \quad (7)$$

其中, E_t 为 t 时段蓄电池的电量; ρ 为蓄电池的自放电率; $P_{ess,t}$ 为 t 时段蓄电池的充放电功率(充电时为正,放电时为负); η_{in} 为充电效率; η_{out} 为放电效率; Δt 为单位时段的持续时间,本文取 1h; $Q_{ess,t,\max}$ 为蓄电池输出或吸收无功功率的最大值(本文规定输出为正,吸收为负); S_{ess} 为蓄电池逆变器容量。

1.4 负荷时序模型

电力负荷随着用电设备的启动、工作、停止而随机变化,但不会出现大的跃变,同时还符合某种程度上的规律性。负荷不仅具有季度性差异,而且在全天呈现一定的时序波动特性。本文采取与电力用户提前签订协议的措施,可在全天的负荷高峰时段对负荷进行一定的主动调整。调整模型如下:

$$\begin{cases} \Delta P_{load,t} = \alpha_{load,t} P_{load,t} \\ \Delta Q_{load,t} = \Delta P_{load,t} \tan \varphi_{load,t} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\Delta P_{load,t}$ 、 $\Delta Q_{load,t}$ 分别为 t 时段节点有功负荷调整量和无功负荷调整量; $\alpha_{load,t}$ 为 t 时段有功负荷调整系数; $\varphi_{load,t}$ 为 t 时段负荷的功率因数角。

2 主动配电网无功电源两层规划模型

2.1 两层规划模型

两层规划模型是一种 2 层之间相互作用的系统优化模型,第二层决策问题基于第一层决策给定的方案得到决策的最优值并反馈到第一层,第一层再根据第二层的最优值进行综合筛选,选择符合全局最优的决策方案。

本文针对电容器的优化配置问题,在规划的同时考虑规划后的运行调度问题以获得更符合实际的方案。规划电容器的位置和容量时必须考虑配电网运行时的

网损和电压偏差,而网损和电压偏差需要考虑主动管理手段 24 h 的具体动作情况才能够计算,并且运行调度时电容器投切容量的确定又是以电容器的安装位置和容量为前提的。因此,两层规划模型与本文的研究内容是相互匹配的。

本文的两层规划模型简要表示为:

$$\begin{cases} \min f=f_1+f_2 \\ \text{s.t. } G(x)\leq 0 \\ g(x,y)\leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, f_1 为规划层目标函数; f_2 为运行层目标函数; $G(x)$ 为规划层约束条件; $g(x,y)$ 为运行层约束条件。

2.2 规划层数学模型

2.2.1 目标函数

规划层以年投资费用为目标函数,年投资费用包括电容器投资费用和维护费用以及残值。目标函数如式(10)所示。

$$f_1 = C_{\text{inv}} + C_m - C_{\text{inv}} \quad (10)$$

其中, C_{inv} 为电容器投资费用; C_m 为电容器维护费用; C_{inv} 为电容器残值。

式(10)中各项费用的具体计算表达式为:

$$\begin{cases} C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^{N_c} (K_c Q_{Ci} + K_f) \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \\ C_m = 8\% \times C_{\text{inv}} \\ C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^{N_c} 5\% \times K_c Q_{Ci} \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \end{cases} \quad (11)$$

其中, K_c 、 K_f 分别为电容器单位容量成本和固定成本; Q_{Ci} 为节点 i 的电容器安装容量; r 为折现系数; m 为电容器使用寿命; N_c 为安装电容器的节点数。

2.2.2 约束条件

电容器安装最大容量约束:

$$0 \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\text{max}} \quad (12)$$

其中, $Q_{Ci\text{max}}$ 为节点 i 处可配置电容器的最大容量。

2.3 运行层数学模型

2.3.1 目标函数

运行层以年运行费用为目标函数,年运行费用包括年网损费用、年电压越限惩罚费用和年负荷调整费用。目标函数如式(13)所示。

$$f_2 = C_p + C_v + C_1 \quad (13)$$

其中, C_p 为年网损费用; C_v 为年电压越限惩罚费用; C_1 为年负荷主动调整费用。

基于时序模型的式(13)中各项费用的表达式为:

$$\begin{cases} C_p = \frac{365}{4} \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^{24} K_p \Delta P_{\text{loss},t,s} \Delta t \\ C_v = \frac{365}{4} \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^{24} K_v \Delta U_{t,s} \\ C_1 = \frac{365}{4} \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^{24} K_1 \Delta P_{\text{load},t,s} \Delta t \end{cases} \quad (14)$$

其中, K_p 、 K_v 、 K_1 分别为网损电价、电压越限惩罚因子、

负荷调整价格; $s=1,2,3,4$ 分别代表春、夏、秋、冬 4 个季节典型日; $\Delta P_{\text{loss},t,s}$ 为 s 季节 t 时段的网损; $\Delta U_{t,s}$ 为 s 季节 t 时段的节点电压越限程度; $\Delta P_{\text{load},t,s}$ 为 s 季节 t 时段的节点有功负荷调整量。

节点 i 的电压越限程度为:

$$\Delta U_{i,t} = \begin{cases} \left(\frac{U_{i,t} - U_{i\text{max}}}{U_{i\text{max}} - U_{i\text{min}}} \right)^2 & U_{i,t} > U_{i\text{max}} \\ 0 & U_{i\text{min}} \leq U_{i,t} \leq U_{i\text{max}} \\ \left(\frac{U_{i\text{min}} - U_{i,t}}{U_{i\text{max}} - U_{i\text{min}}} \right)^2 & U_{i,t} < U_{i\text{min}} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $U_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压; $U_{i\text{max}}$ 、 $U_{i\text{min}}$ 分别为节点 i 电压的上、下限。

2.3.2 约束条件

约束条件包括功率平衡约束、节点电压约束、支路传输功率约束、变压器分接头约束、DG 约束、电容器约束和负荷调整约束,如式(16)所示。

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \\ U_{i\text{min}} \leq U_{i,t} \leq U_{i\text{max}} \\ S_{k,t,\text{tra}} \leq S_{k,\text{tra}\text{max}} \\ T_{\text{min}} \leq T_t \leq T_{\text{max}} \\ A_T \leq A_{T\text{max}} \\ \cos \varphi_{\text{DGmin}} \leq \cos \varphi_{\text{DG},t} \leq \cos \varphi_{\text{DGmax}} \\ Q_{\text{DGmin}} \leq Q_{\text{DG},t} \leq Q_{\text{DGmax}} \\ 0 \leq Q_{Ci,t} \leq Q_{Ci} \\ A_{Ci} \leq A_{C\text{max}} \\ Q_{\text{essmin}} \leq Q_{\text{ess},t} \leq Q_{\text{essmax}} \\ 0 \leq \alpha_{\text{load},t} \leq \alpha_{\text{max}} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 注入的有功功率和无功功率; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; N 为节点数目; G_{ij} 、 B_{ij} 、 $\theta_{ij,t}$ 分别为节点 i 与节点 j 之间的电导、电纳和 t 时段的电压相角; $S_{k,t,\text{tra}}$ 、 $S_{k,\text{tra}\text{max}}$ 分别为支路 k 在 t 时段的传输功率和最大传输功率; T_t 为 t 时段的变压器分接头位置; T_{max} 、 T_{min} 分别为变压器分接头位置的上、下限; A_T 、 $A_{T\text{max}}$ 分别为变压器分接头日动作次数和日最大动作次数; $\cos \varphi_{\text{DG},t}$ 为 t 时段的 DG 功率因数; $\cos \varphi_{\text{DGmax}}$ 、 $\cos \varphi_{\text{DGmin}}$ 分别为 DG 功率因数上、下限; $Q_{\text{DG},t}$ 、 Q_{DGmax} 、 Q_{DGmin} 分别为 DG 在 t 时段的无功功率出力及其无功功率上、下限; $Q_{Ci,t}$ 为 t 时段节点 i 的电容器投入容量; A_{Ci} 、 $A_{C\text{max}}$ 分别为节点 i 处电容器的日投切次数和最大日投切次数; $Q_{\text{ess},t}$ 、 Q_{essmax} 、 Q_{essmin} 分别为蓄电池在 t 时段的无功功率出力及其无功功率上、下限; α_{max} 为有功负荷调整系数的最大值。

3 求解方法

本文采用基于小生境的遗传算法^[17]对两层规划

模型进行求解,规划层需要优化电容器的位置及容量,为了有限离散整数值,采用整数编码方式;运行层模拟配电网主动管理后的优化运行,由于风力发电机、光伏电池的有功出力受自然资源影响,本文对其有功不采取控制,主动配电网优化运行的控制变量包括各节点已配置的电容器的优化投切容量、变压器分接头位置、风力发电机无功出力、光伏电池无功出力、储能无功出力,采用混合编码方式。

3.1 两层控制变量编码

规划层染色体的基因个数由待配置电容器节点的个数确定,每个染色体表示电容器的接入容量和位置,采取十进制整数编码方式,0 表示不接入,1 表示接入容量为 10 kvar,2 表示接入容量为 20 kvar,依此类推。每个染色体如式(17)所示。

$$C_1 C_2 C_3 \cdots C_{N_c} \quad (17)$$

运行层控制变量为上文所提主动管理手段,采取十进制混合编码方式,每个染色体由如下六部分组成:电容器的优化投切容量、变压器分接头位置、风力发电机无功出力、光伏电池无功出力、储能无功出力、负荷调整系数 6 种控制变量在 24 h 的状态。由于电容器和变压器分接头有日最大动作次数的限制,所以将电容器和变压器分接头控制变量部分的基因组编码为动作时刻和动作状态 2 个部分;风力发电机无功出力部分共有 $N_{WT} \times 24$ 个基因,第 $(q-1) \times 24 + t$ 个基因表示第 q 台风力发电机在 t 时段的无功出力,其他部分依此类推。具体运行层染色体如式(18)所示。

$$\begin{aligned} & Q_1^c Q_2^c \cdots Q_{N_c}^c | T_1 T_2 \cdots T_{N_T} | Q_1^{WT} Q_2^{WT} \cdots Q_{N_{WT}}^{WT} | \\ & Q_1^{PV} Q_2^{PV} \cdots Q_{N_{PV}}^{PV} | \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_{N_L} | Q_1^{ESS} Q_2^{ESS} \cdots Q_{N_{ESS}}^{ESS} | \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Q_i^c = [t_i^{c,1} t_i^{c,2} \cdots t_i^{c,K} | Q_i^{c,0} Q_i^{c,1} \cdots Q_i^{c,K}] & i=1, 2, \dots, N_c \\ T_j = [t_j^1 t_j^2 \cdots t_j^K | T_j^0 T_j^1 \cdots T_j^K] & j=1, 2, \dots, N_T \\ Q_u^{WT} = [Q_u^{WT,1} Q_u^{WT,2} \cdots Q_u^{WT,24}] & u=1, 2, \dots, N_{WT} \\ Q_s^{PV} = [Q_s^{PV,1} Q_s^{PV,2} \cdots Q_s^{PV,24}] & s=1, 2, \dots, N_{PV} \\ \alpha_w = [\alpha_w^1 \alpha_w^2 \cdots \alpha_w^{24}] & w=1, 2, \dots, N_L \\ Q_l^{ESS} = [Q_l^{ESS,1} Q_l^{ESS,2} \cdots Q_l^{ESS,24}] & l=1, 2, \dots, N_{ESS} \end{cases}$$

其中, K 为电容器组或变压器分接头的一天最大动作次数。

以上编码方式不仅充分考虑了各个控制变量 24 h 的运行状态,而且在编码时计及了电容器和变压器分接头的日动作次数要求,避免了产生不满足日动作次数的大量不可行解,降低了染色体的编码长度,提高了遗传算法的运行效率。

3.2 求解流程

基于所提两层规划模型的主动配电网无功电源规划求解步骤如下。

a. 读取四季典型日风力发电机、光伏电池、负荷数据、系统阻抗等参数,初始化遗传算法中使用参数,如种群大小、交叉概率、变异概率等。

b. 根据候选节点个数初始化规划层各规划方案电容器位置和容量。

c. 计算各规划方案的年静态费用,利用运行层遗传算法计算各规划方案中电容器和主动管理手段的最优时序出力,然后计算各规划方案的最优年运行费用。

d. 综合各规划方案的年静态费用和年运行费用并进行比较,得到当前最优规划方案。

e. 判断遗传算法是否收敛,若没有收敛,则对各规划方案中的电容器位置和容量进行选择、交叉、变异、小生境淘汰操作,产生下一代种群,并返回步骤 c; 否则继续执行步骤 f。

f. 算法结束,得到最优电容器规划方案。

具体流程图如图 1 所示。

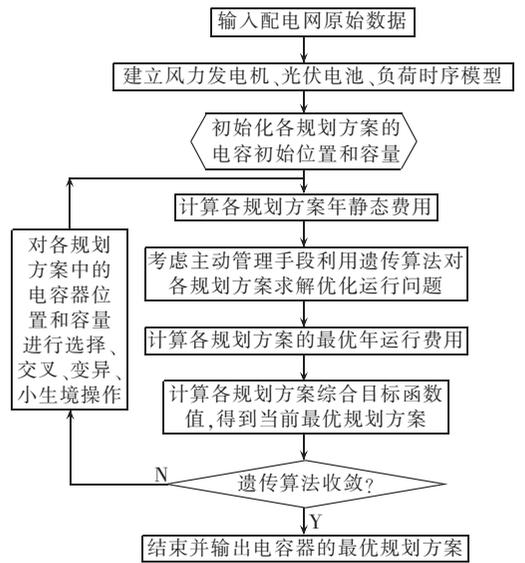


图 1 求解流程图
Fig.1 Flowchart of solver

4 算例分析

4.1 算例介绍

本文的算例采用改进的 IEEE 33 节点配电系统,系统结构如图 2 所示,其中最大有功负荷为 3.715 MW,最大无功负荷为 2.3 Mvar, DG 渗透率约为 27%,系统额定电压为 10 kV。风力发电机的接入节点为节点 17、29,光伏电池接入的节点为节点 24、32,蓄电池

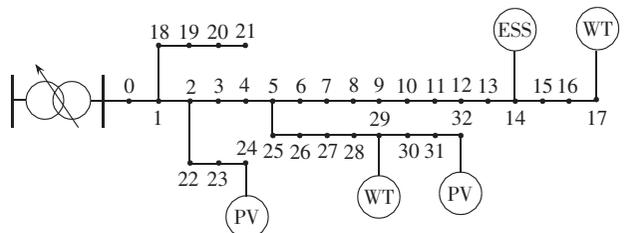


图 2 IEEE 33 节点配电系统
Fig.2 IEEE 33-bus distribution system

接入的节点为节点 14, 可调整的负荷节点为节点 10、20, 候选电容器补偿节点为节点 3、7、13、19、23、26。

假设电容器的寿命周期为 10 a, 投资成本参考文献[12]分为固定成本和容量成本, 其中各节点固定成本为 1 万元, 容量成本为 50 元/kvar, 维护成本取初始投资的 8%, 残值取容量成本的 5%, 贴现率取 8%, 电容器的单组容量为 50 kvar, 每个候选节点安装电容器组数上限为 10 组; 变压器分接头调节档位共 17 档, 变比调节范围为 $\pm 8 \times 1.25\%$ 。每个典型日的电容器和变压器分接头最大动作次数为 10 次, 调节最小时间间隔为 1h。节点 17 的风力发电机容量为 300 kW, 节点 29 的风力发电机容量为 200 kW; 节点 24 的光伏电池容量为 300 kW, 节点 32 的光伏电池容量为 200 kW; 节点 14 的蓄电池容量为 300 kW·h, 其荷电状态上、下限分别为 0.9 和 0.1, 最大充放电功率为 60 kW, 充放电效率为 0.9, 自放电率为 0.005; 节点负荷调整系数最大值取 10%。系统网损电价为 0.5 元/(kW·h), 有功负荷调整电价为 1 元/(kW·h)^[18]。节点电压约束为 0.93~1.07 p.u., 电压越限惩罚因子应取一个尽可能大的值, 本文考虑取 10 000。

本文综合考虑计算量和准确度, 采用典型日的运行情况代表全年的运行特点。此外, 本文运行层在模拟运行时是在有功调度已经完成的基础上进行的, 即已知蓄电池的充放电曲线, 充放电曲线运用文献[19]的削峰填谷模型考虑可变充放电功率计算而得, 如图 3 所示。故 4 个典型日的等效有功负荷和无功负荷分别如图 4、图 5 所示。

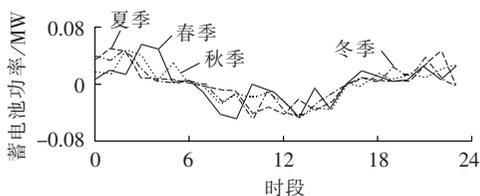


图 3 蓄电池充放电功率

Fig.3 Charging/discharging power of battery

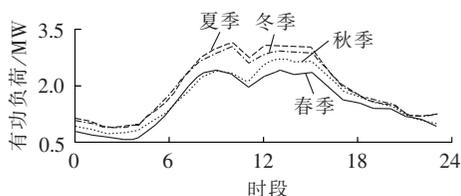


图 4 等效有功负荷

Fig.4 Equivalent active load

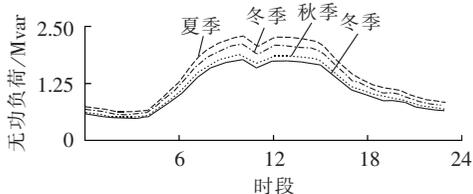


图 5 等效无功负荷

Fig.5 Equivalent reactive load

4.2 结果分析

为了验证本文所提模型和算法的适用性, 分别建立了以下 4 种场景对无功电源规划结果进行仿真分析: 场景 1, 不考虑任何控制措施, 即初始网络状态(初始配电网); 场景 2, 考虑变压器分接头调整、电容器分散补偿, 不考虑 DG、储能(传统配电网); 场景 3, 考虑变压器分接头调整、电容器分散补偿和功率因数为 1 的 DG, 不考虑储能(有源配电网); 场景 4, 考虑变压器分接头调整、电容器分散补偿、DG 有功无功出力、储能无功出力、负荷调整(主动配电网)。4 种场景的电容器配置组数和年费用分别如表 1、2 所示。

表 1 各场景规划方案

Table 1 Planning schemes of different scenarios

节点	电容器配置组数			
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
3	0	0	0	0
7	0	2	2	3
13	0	6	7	2
19	0	7	8	0
23	0	7	7	4
26	0	9	3	9
合计	0	31	27	19

表 2 各场景规划方案年费用

Table 2 Annual costs of different planning schemes

场景	年电容器费用/万元	年网损费用/万元	年电压越限惩罚费用/万元	年负荷调整费用/万元	年总费用/万元
1	0	125.37	9966.7	0	10092.07
2	2.04	109.97	0	0	112.01
3	1.88	81.81	0	0	83.69
4	1.36	74.83	0	5.22	81.41

由表 1、表 2 的规划结果, 经过分析可以得到如下结论。

a. 变压器分接头调整和分散配置电容器有效地减少了配电网的有功损耗和改善了配电网的电压水平。场景 1 与场景 2 相比, 场景 2 的电容器配置组数为 31 组, 配置容量为 1.55 Mvar, 年有功网损费用比场景 1 减少了 15.4 万元, 年电压越限惩罚费用比场景 1 降低了 9966.7 万元, 总费用比场景 1 降低了 9980.06 万元。

b. DG 的接入显著地降低了网损费用和电容器配置容量。场景 2 与场景 3 相比, 场景 3 的电容器安装组数比场景 2 减少了 4 组, 配置容量减少 0.2 Mvar, 年总费用降低了 28.32 万元。

c. 各种主动管理手段在配电网中的相互配合进一步地降低了电容器配置容量, 规划方案经济效益提升显著。场景 3 与场景 4 相比, 场景 4 的电容器安装组数比场景 3 减少了 8 组, 配置容量减少了 0.4 Mvar, 年电容器费用降低了 0.52 万元, 年总费用降低了 2.28 万元。

通过以上 4 种场景的仿真分析可以发现,主动配电网中丰富的可控分布式资源对电容器的规划结果有着显著的影响。对分布式资源进行协调控制和综合管理,降低了主动配电网中电容器的投资,减少了资源浪费,并且提升了主动配电网的经济效益。相比于其他配电网,主动配电网的电容器规划方案综合效果最优。

图 6 给出了全年 4 种场景下各节点电压期望值(标幺值)。由图 6 可看出,电容器的分散补偿显著提升了系统各节点的电压质量。场景 1,即系统优化前,出现电压越限的节点有节点 8—17、27—32,节点电压越限情况较为严重,而其他场景通过变压器分接头控制和电容器分散补偿等控制手段均实现了各节点电压无越限的情况,体现了较好的综合电压控制效果。另外,场景 1 中在支路末端的节点 17 的电压期望值仅为 0.904 p.u.;场景 2,即传统配电网,优化后节点 17 的电压期望值为 0.970 p.u.;场景 3,即有源配电网,优化后节点 17 的电压期望值为 0.983 p.u.;场景 4,即主动配电网,优化后节点 17 的电压期望值则提高为 0.991 p.u.,表明了主动配电网的综合电压控制效果最优。

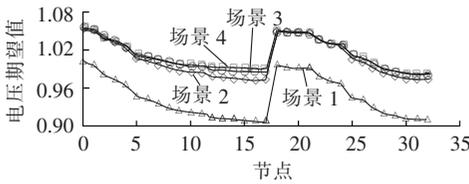


图 6 各场景节点电压期望值

Fig.6 Nodal voltage expectations of different scenarios

为了体现本文无功电源规划方案的有效性和准确性,采用本文规划方法产生 10 个较优的无功规划方案可行解,再运用文献[20]的马尔科夫链模型基于风光荷的历史数据随机生成 50 条日时序曲线对可行解进行评估,评估结果采用百分制打分表示,从而将评价最好的无功规划方案作为本文最终的无功规划结果。评价结果如表 3、图 7 所示。由表 3、图 7 可以直观地看出,方案 9 的总评分最高,为本文无功

表 3 无功方案可行解评估

Table 3 Feasible solution evaluation of reactive-power planning

方案	可行解	总评分
1	3(0),7(5),13(4),19(0),23(6),26(10)	253.80
2	3(0),7(4),13(2),19(3),23(6),26(5)	263.12
3	3(6),7(3),13(1),19(3),23(0),26(4)	267.34
4	3(1),7(1),13(9),19(0),23(2),26(5)	276.52
5	3(1),7(6),13(2),19(0),23(3),26(4)	269.75
6	3(0),7(6),13(6),19(2),23(0),26(2)	253.19
7	3(0),7(9),13(9),19(0),23(6),26(4)	247.14
8	3(1),7(9),13(6),19(0),23(9),26(0)	276.72
9	3(0),7(3),13(2),19(0),23(4),26(9)	277.16
10	3(2),7(0),13(2),19(4),23(1),26(9)	241.30

注:3(2)表示在节点 3 安装 2 组电容器,其他同。

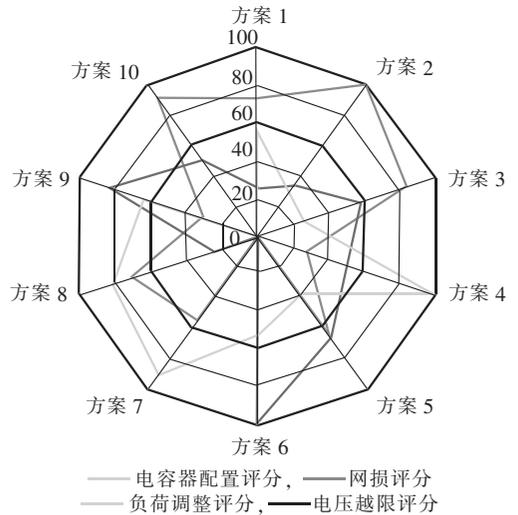


图 7 无功方案评估结果

Fig.7 Results of reactive-power planning evaluation

规划最优方案。各个方案模拟运行时均没有出现电压越限的情况,这是因为本文算例仅有一条馈线,变压器分接头的调节效果较强。

5 结论

针对间歇性 DG 出力和负荷功率的随机性和波动性,分别建立其时序模型,并建立了两层无功电源优化规划模型,对电容器进行了综合优化配置,得到以下结论:

- a. 配电网实际运行效果会影响电容器的优化规划结果,而电容器的规划容量及其日最大投切次数、DG 出力和负荷功率的波动性对配电网实际运行有着极大的影响;
- b. 计及 DG 出力间歇性和负荷波动性的时序模型使配电网无功电源规划结果更贴近实际,更能真实体现配电网的各项技术指标,提高了配电网无功电源规划方案的准确性;
- c. 主动配电网中的主动管理手段与无功电源规划相结合进行综合规划大幅降低了资源浪费,改善了系统的电压水平,减少了年费用,相比于其他配电网,主动配电网可以获得更高经济效益的无功电源规划方案。

参考文献:

[1] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京:中国电力出版社,2014:230-232.

[2] GOLSHAN M E H,AREFIFAR S A. Distributed generation, reactive sources and network-configuration planning for power and energy-loss reduction[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution,2006,153(2):127-136.

[3] 刘杨华,吴政球,涂有庆,等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术,2009,32(15):72-76.

LIU Yanghua,WU Zhengqiu,TU Youqing,et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power

- System Technology, 2009, 32(15): 72-76.
- [4] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [5] 杨丽徙, 徐中友, 朱向前. 基于改进遗传算法的配电网无功优化规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2007, 34(1): 26-30.
YANG Lixi, XU Zhongyou, ZHU Xiangqian. Optimization of reactive power planning of distribution systems based on improved genetic algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2007, 34(1): 26-30.
- [6] 高丽萍, 王建勋, 刘会金. 基于改进遗传算法的配电网无功规划优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(4): 5-9.
GAO Liping, WANG Jianxun, LIU Huijin. Reactive plan optimization of distribution network based on the improved genetic algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(4): 5-9.
- [7] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤, 等. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173.
HU Zechun, ZHONG Mingming, WANG Jiexian, et al. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.
- [8] 张沈习, 程浩忠, 张立波, 等. 含风电机组的配电网多目标无功规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 41-46.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Multi-objective reactive power planning in distribution system incorporating with wind turbine generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 41-46.
- [9] MULLER S, DEICKE M, DE DONCKER R W. Adjustable speed generations for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant IGBT converters linked to the rotor[C]// Industry Applications Conference, 2000. Rome, Italy: IEEE, 2000: 2249-2254.
- [10] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风机发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2715-2720.
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2715-2720.
- [11] FANG Xin, LI Fangxing, WEI Yanli, et al. Reactive power planning under high penetration of wind energy using benders decomposition[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2015, 9(14): 1835-1844.
- [12] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [13] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于2层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 25-33.
GUO Jinming, LI Xinran, DENG Wei, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation and reactive power compensation based on bilevel planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 25-33.
- [14] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.
CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.
- [15] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [16] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.
- [17] 王瑞琪, 张承慧, 李珂, 等. 基于小生境遗传算法的微电网控制与优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 7-14.
WANG Ruiqi, ZHANG Chenghui, LI Ke, et al. Control and optimization based on niche genetic algorithm for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 7-14.
- [18] 牛文娟, 李扬, 王磊. 基于风险评估和机会约束的不确定性可中断负荷优化调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 62-67.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Lei. Optimal dispatch of uncertain interruptible loads based on risk assessment and chance constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 62-67.
- [19] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 232-237.
CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237.
- [20] 蒋平, 霍雨翀, 张龙, 等. 基于改进一阶马尔可夫链的风速时间序列模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 22-27.
JIANG Ping, HUO Yuzhong, ZHANG Long, et al. A wind speed time series model based on advanced first-order Markov chain approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 22-27.

作者简介:



符 杨

符 杨(1968—),男,江苏南通人,教授,博士,主要研究方向为城市电网规划、变压器检测与故障诊断、风力发电与并网技术等(**E-mail**:mfudong@126.cn);

缪润利(1991—),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为主动配电网无功电源规划(**E-mail**:miaorunli@qq.com);

李振坤(1982—),男,山东滨州人,副教授,博士,主要研究方向为配电网规划与运行控制、分布式电源并网及微电网、主动配电网技术等(**E-mail**:lzk021@163.com)。

Reactive-power planning based on time-sequence characteristics of active distribution network

FU Yang¹, MIAO Runli², LI Zhenkun¹, ZHANG Daihong³, JIN Shanhong³

(1. School of Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou 325000, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Company Jiaxing Power Supply Company, Jiaxing 314000, China)

Abstract: Though the active distribution network integrates rich controllable resources, the present reactive-power planning of distribution network does not take the active managements into consideration, resulting in that the reactive-power optimization hardly reflects the fully comprehensive benefits. A two-layer planning model is established based on the time-sequence characteristics of active distribution network, which considers the active managements, such as distributed generation, transformer tap, energy storage, load regulation, etc. Capacitors are optimally configured according to their operational characteristics in the planning. The investment and maintenance costs of capacitors are considered in its planning layer while the annual operational cost of distribution network is considered in its operating layer. The genetic algorithm based on ecological niche is applied to solve the model. Simulative results show that, the active managements considered in the capacitor planning help to improve the resource utilization rate and reduce the investment and operational costs of distribution network; the full use of the reactive-power regulation ability of distributed generations and energy storage is conducive to the safe and economic operation of distribution network.

Key words: active distribution network; active management; controllable resources; two-layer planning; time-sequence characteristics; capacitors