

含电动汽车充电站和风电的配电网无功优化

电动汽车充电负荷的不确定性以及风电机组出力的随机性给配电网无功优化带来了新的挑战。研究了含电动汽车充电站和风电的配电网无功优化模型和算法,建立了电动汽车充电负荷模型和风电出力模型,将风电场作为连续可控的无功源参与无功优化。基于机会约束规划方法建立了含电动汽车充电站和风电的配电网多目标无功优化模型。算例结果表明本文所建配电网无功优化模型能够提高配电网运行的经济性与可靠性。

邢志斌 韦 钢/上海电力学院电气工程学院 贺 静/国网上海市电力公司嘉定供电公司 褚佳媛/上海合泽电力工程设计咨询有限公司



邢志斌/硕士研究生

随着石油、煤炭和天然气等化石能源的日益枯竭,风能作为最具发展潜力的可再生能源之一,已在世界各国得到了大力的发展。电动汽车(Electric Vehicles)因为具有污染小、启动快、噪声低和能源利用率高等特点^[1],越来越受到人们的青睐。风电和电动汽车大量接入配电网已经成为一种必然的趋势。但是风电出力和电动汽车充电负荷的不确定性都给配电网无功优化带来了不小的挑战。

目前,国内外学者针对配电网的无功优化方面做了很多研究,但对含电动汽车充电站和风电的配电网无功优化方面研究较少。文献[2]引入静止无功补偿器(SVC)以应对分布式电源接入给配电网无功优化带来的影响,而且充分利用系统中原有的柴油发电机无功调节能力以达到较好的无功优化效果。文献[3]详细分析了双馈风力发电机(Doubly Fed

Induction Generator, DFIG)的功率特性,提出充分发挥双馈风力发电机的连续无功调节能力以达到较好的无功调节效果,同时也节省了安装无功补偿设备的费用。文献[4]在模型求解算法方面作了有益探索,提出采用聚类竞争克隆机制的多智能体免疫算法求解配电网无功优化模型,与传统算法相比,该算法优化效果更好,收敛速度更快。

本文建立了电动汽车充电负荷模型,提出充分发挥风电机组的无功出力能力以应对电动汽车充电负荷和风电机组出力不确定性所带来的挑战。在建立了考虑经济性、可靠性和稳定性的多目标无功优化模型,并在所建33节点的配电系统中进行计算验证,结果表明本文所建的模型适用于含电动汽车充电站和风电的配电网无功优化。

电动汽车充电负荷模型

温室效应和空气污染带来的影响越来越显著,世界各国都对能源和环境问题给与了极大的关注,人们也越来越意识到低碳生活的重要性。由于能达到良好的节能减排效果,电动汽车的发展得到各国政府的大力支持。与此同时,一些大的汽车生产商像特斯拉、丰田、日产和比亚迪等,在电动汽车的研发上投入了大量的资金和人员,使得电动汽车的技术越来越成熟,生产的产品越来越受到人们的青睐,电动汽车保有量也在逐年升高。电动汽车用户会根据自己的需求选择进行充电的时间和地点,影响充电负荷主要因素包括:电动汽车每

关键词/Keywords

电动汽车·
风电·
配电网·
无功优化·

上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目
(13DZ2251900)。

天行驶里程、电动汽车的充电功率、电动汽车电池荷电状态 (State Of Charge, SOC) 和电动汽车充电开始时间。

(1) 日行驶里程

电动汽车主要用于居民日常上下班、接送孩子和购物等,其主要特点是:行驶随机性大、行驶里程短且泊车时间长。采用统计学手段对现有数据进行有效分析,发现电动汽车每天行驶的距离服从如式(1)所示的对数正态分布^[5],其概率密度函数为

$$f_l(l) = \frac{1}{\sigma_l \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right] \quad (1)$$

式中, l 为行驶里程; $\mu_l = 3.21$; $\sigma_l = 0.87$ 。

(2) 电动汽车的充电功率

本文所提到的电动汽车都采用常规慢充电的方式进行充电,在该充电方式中,充电的起始阶段和结束阶段相较于整个充电过程可以忽略不计,电动汽车的充电功率 P_c 在 2~3 kW 内服从均匀分布,即

$$f_p(x) = \begin{cases} 1 & x \in [2, 3] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 电池荷电状态 SOC

SOC 是电动汽车剩余电池容量和完全充满后电池容量的比率,代表电动汽车蓄电池的荷电状态, SOC 与日行驶里程有如下关系^[6]

$$\text{SOC}_{\text{EV}} = (1 - \frac{1}{l_r}) \times 100\% \quad (3)$$

式中, l_r 为在 SOC 为 100% 状态时电动汽车所能行驶的最大距离, m。考虑到电动汽车的正常使用,本文 SOC 的取值范围为 0.45~1.0。在荷电状态 SOC 已知的情况下便能求出每辆电动汽车的充电时间长度,即

$$T_c = \frac{SW_{100}}{100P_c\eta_{\text{EV}}} \quad (4)$$

式中, W_{100} 为电动汽车每行驶 100 km 所耗电量; η_{EV} 为电动汽车在充电站充电时的充电效率。

(4) 电动汽车充电开始时间

用户通常会在结束一天的行驶里程后将电动汽车接入电网进行充电,本文假设车辆行驶结束

时间即为充电开始时间,在对相关的数据作了详细分析之后,得出如下结论:电动汽车开始充电时刻 t 满足如下分段正态分布,即

$$f_t(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - \mu_t)^2}{\sigma_t^2}\right) & (\mu_t - 12) < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t + 24 - \mu_t)^2}{\sigma_t^2}\right) & 0 < t \leq (\mu_t - 12) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\mu_t = 17.58$; $\sigma_t = 3.41$ 。

在知道电动汽车充电功率、充电时长和充电开始时间后,便能求出一台电动汽车每天的充电功率。由于每辆电动汽车充电是相互独立的,采用 Monte Carlo 随机抽取的方法便可以求出电动汽车的日充电功率,计算流程如图 1 所示,充电负荷为

$$P_{\text{EVload}}[t] = \sum_{i=1}^N P_i[t] \quad (6)$$

式中, N 为该电动汽车充电站所服务电动汽车数量; $P_{\text{EVload}}[t]$ 为 t 时段电动汽车充电站的充电负荷; $t = 1, 2, \dots, 24$; $P_i[t]$ 为单台电动汽车的充电功率。

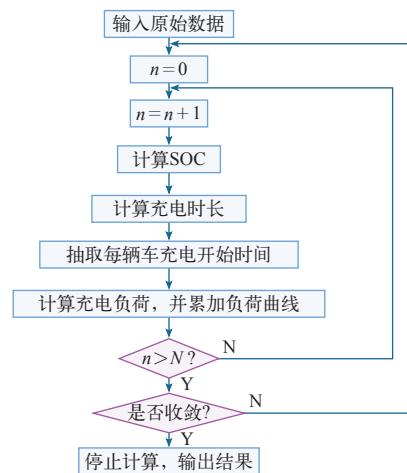


图1 基于蒙特卡洛方法电动汽车充电负荷计算流程

配电网无功优化模型

电动汽车用户的充电行为和风电机组出力的不确定性易导致配电网潮流大小、方向频繁变化,将造成电压波动,增大系统网损,加大配电网无功优化的难度。传统的配电网无功调节手段

像投切电容器组、调节变压器分接头位置具有调节离散化、调节速度慢且难以实现电压连续调节等缺点,已经不能满足当下的需求。

由于具有可变速运行、变流容量小等优点,DFIG已经成为了风电场主流机型,该类风力发电机还有一个突出的优点,那就是能够灵活地调节无功出力^[7]。基于此优点,本文在建立模型时,不仅应用传动无功调节手段,而且考虑了双馈风电机组的无功调节能力,将调节风电场无功出力也作为一种调节手段,使其与传统的无功调节手段相结合以解决目前所面临的问题。

1. 目标函数

本文所建配电网无功优化模型不但考虑了配电网运行经济性而且还考虑了配电网运行的可靠性和稳定性。所建多目标无功优化模型的目标函数如下

$$\begin{cases} \min F_1 = P_{\text{loss}} = \sum_{k \in N_k} G_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}] \\ \min F_2 = \Delta U = \sum_{l \in N_E} \left(\frac{U_l - U_l^N}{\Delta U_l^{\max}} \right) \\ \min F_3 = V_{\text{SM}} = \delta_{\min} \end{cases} \quad (7)$$

式中, F_1 为配电网网损; N_k 为系统的支路数; G_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电导; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电压相角差; F_2 为电压偏差; N_E 为系统的节点数; U_l 为负荷节点 l 的实际电压幅值; U_l^N 为负荷节点 l 期望电压的幅值; $\Delta U_l^{\max}$ 为最大允许电压偏差; F_3 为系统静态电压稳定裕度指标,用常规收敛潮流雅克比矩阵的最小奇异值 $\delta_{\min}$ 来衡量该指标。

由于不同目标函数的量纲不同,为了方便计算,需要对其进行归一化处理

$$\begin{cases} P'_{\text{loss}} = (P_{\text{loss}} - P_{\text{loss min}}) / (P_{\text{loss 0}} - P_{\text{loss min}}) \\ \Delta U' = (\Delta U - \Delta U_{\min}) / (\Delta U_0 - \Delta U_{\min}) \\ V'_{\text{SM}} = (V_{\text{SM max}} - V_{\text{SM}}) / (V_{\text{SM max}} - V_{\text{SM 0}}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{\text{loss min}}$ 、 $\Delta U_{\min}$ 和 $V_{\text{SM max}}$ 为对各个目标函数分别进行单目标优化时所得的最优值; $P_{\text{loss 0}}$ 、 ΔU_0 和 $V_{\text{SM 0}}$ 分别为在初始状态下进行潮流计算所得到的各指标的初始值。

归一化处理之后,运用加权方式可得到总的

目标函数

$$\min F = \lambda_1 P'_{\text{loss}} + \lambda_2 \Delta U' + \lambda_3 V'_{\text{SM}} \quad (9)$$

式中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为目标权重系数,反映对不同指标的偏好程度,必须满足 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$,且 $\lambda_1 \geq 0$, $\lambda_2 \geq 0$, $\lambda_3 \geq 0$ 。

2. 等式约束

在本文所建模无功优化数学模型中等式约束为负荷节点的有功功率平衡约束和无功功率平衡约束

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (10)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (11)$$

3. 不等式约束

在本文所建模无功优化数学模型中不等式约束包括控制变量不等式约束和状态变量不等式约束。

1) 控制变量不等式约束为

$$Q_{\text{Ti, min}} \leq Q_{\text{Ti}} \leq Q_{\text{Ti, max}} \quad (12)$$

$$Q_{\text{Ci, min}} \leq Q_{\text{Ci}} \leq Q_{\text{Ci, max}} \quad (13)$$

$$T_{\text{api, min}} \leq T_{\text{api}} \leq T_{\text{api, max}} \quad (14)$$

式中, Q_{Ti} 和 Q_{Ci} 分别为风电场发出的无功功率和并联电容器组数; T_{api} 为有载变压器分接头的位置。

2) 状态变量不等式约束。由于风电出力和电动汽车充放电负荷的不确定性使得配电网节点电压存在越限的风险,若要保证任何情况下节点电压都不越限,则需要投入更多的并联电容器,让风电机组发出更多的无功功率,这就增加了运行成本,降低了配电网运行经济性。而实际上某些极端情况发生概率很小,持续时间也很短,因此对节点电压约束采用机会约束^[8]更符合实际

$$P\{U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, i \in \Omega_{\text{node}}\} \geq \beta \quad (15)$$

式中, $P\{\cdot\}$ 为条件成立的概率; $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点电压上下限值; Ω_{node} 为系统所有节点集合; β 为电压约束的置信水平。

优化求解

1. 随机潮流

由于电动汽车充电站与风力发电机的存在,将会造成网络拓扑结构、节点注入功率等数据有很大的随机性。所以随机潮流在揭示电力系统的运行特性上更有优势,它比一般潮流计算更符合

实际。为了计及这些不确定性因素的影响，本文在计算潮流节点电压和支路功率的概率分布的过程中，采用了基于半不变量的随机潮流算法^[9]。

2. 求解算法

配电网无功优化的本质是非线性混合整数规划问题，具有多状态、多约束条件等特征。本文采用基于混合基因编码的改进遗传算^[10]法对模型进行求解，并根据种群和个体的适应度调整交叉和变异算子，具体流程如图2所示。

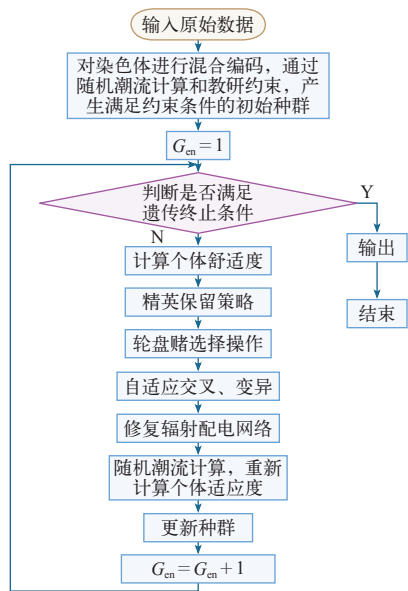


图2 改进遗传算法流程图

算例

为了验证所建模型和所提算法的有效性，采用Matlab2011a软件对改进的IEEE 33节点配电系统进行无功优化计算，原始线路和负荷参见文献[11]。如图3所示，对配电系统作了适当修改，在节点5、30处各接8组电容器，每组的容量为100 kvar，用C₁、C₂表示；在节点1、12接入由2台1.5 MW变速恒频双馈感应风力发电机组组成的风

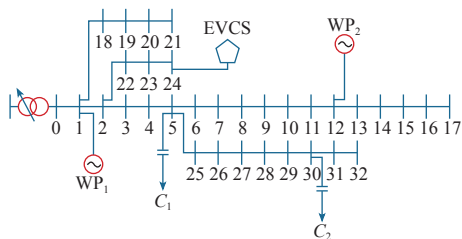


图3 33节点系统接线图

电场，用WP₁、WP₂表示；在节点24接入电动汽车充电桩，用EVCS表示。变压器电压比的调节范围是0.9~1.1，正负各有8个档位，系统节点电压幅值限定为U_{min}=0.95，U_{max}=1.05，置信水平β取0.95。取λ₁=λ₂=0.25，λ₃=0.5。

风电场和电动汽车充电桩的具体参数如下。

1) 在节点1、12处各接入由2台风力发电机组组成的风电场。风力发电机组额定功率P_R=1.0 MW，切入风速v_{ci}=4 m/s，额定风速v_r=14 m/s，切出风速v_{co}=24 m/s。表1为1天中各时段平均预测风速。

表1 各时段平均预测风速均值

时段	均值 /(m/s)	时段	均值 /(m/s)	时段	均值 /(m/s)	时段	均值 /(m/s)
1	14.3	7	9.3	13	6.6	19	9.0
2	17.5	8	8.8	14	7.3	20	13.6
3	10.6	9	9.2	15	8.2	21	12.0
4	8.0	10	5.5	16	4.6	22	9.7
5	8.1	11	6.3	17	8.8	23	13.8
6	9.5	12	7.7	18	10.8	24	12.1

2) 假设24节点上所接电动汽车充电桩每天为300辆电动汽车提供服务，而且每辆电动汽车的电池容量为24 kW·h，平均时速为40 km/h，能量损耗为0.15 kW·h/km，充电功率为3.6 kW。采用MonteCarlo方法求出1天内24个时段电动汽车充电桩充电功率需求的期望和标准差，各时间点的样本为5 000个，结果如图4所示。

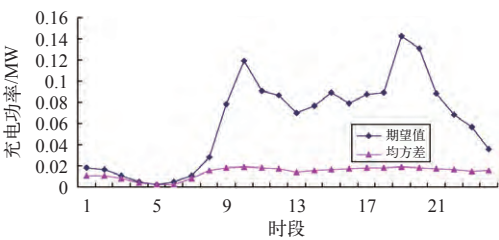


图4 电动汽车充电桩充电功率

本文选取3个时间点——6:00、12:00和18:00（分别记为T₁、T₂和T₃）对配电网电压的优化问题进行仿真研究。优化结果如表2所示。

结果表明，按照本文优化模型计算出的数据调节相应无功补偿设备，可以使配电网网损网损大大降低，提高了系统运行经济性。

表2 无功优化前后控制变量参数及网损的对比

		V_R	Q_{WT1}	Q_{WT2}	Q_{C1}	Q_{C2}	网损/kW
T_1	优化前	1	0	0	0	0	384.345 2
	优化后	1.05	499.48	325.16	600	700	97.314 9
T_2	优化前	1	0	0	0	0	376.339 82
	优化后	1.05	487.73	314.65	600	600	89.751 4
T_3	优化前	1	0	0	0	0	376.339 82
	优化后	1.10	499.48	325.16	400	500	77.537 6

如图5所示，列出了 T_2 时段配电系统优化前后各节点电压，从图5中可以看出采用本文的无功优化模型对配电网进行无功优化，能有效降低电压越限概率，改善电压质量，提高系统运行稳定性。

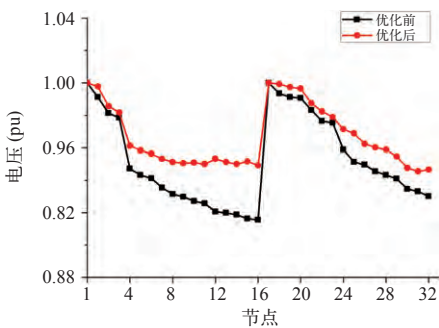


图5 T_2 时段电压曲线

结束语

本文考虑了电动汽车充电负荷和风力发电机组出力的不确定性，建立了含电动汽车充电站和风电的配电网多目标无功优化模型。主要结论如下所述。

1) 基于大量统计数据建立了电动汽车充电负荷模型，该模型考虑了每天行驶里程、电动汽车充电功率、电动汽车电池荷电状态和电动汽车充电开始时间四个影响因素，对研究未来大量电动汽车接入配电网或微电网所造成的影响具有一定的参考价值。

2) 在应用传统无功调节手段的同时，充分发挥双馈风电机组的连续无功调节能力，将风电场作为连续的无功电源参与配电网的无功优化，能达到较好的无功优化效果。

3) 基于文中模型得到的优化方案对电动汽车充电负荷和风电机组输出功率的随机变化具有较

好的适应性。

参考文献

[1] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用 [J]. 中国电力, 2011, 32 (4) : 1-10.

[2] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14) : 20-24.

[3] 赵晶晶, 符杨, 李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (11) : 33-38.

[4] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (3) : 168-174.

[5] 蔡德福, 钱斌, 陈金富, 等. 含电动汽车充电负荷和风电的电力系统动态概率特性分析 [J]. 电网技术, 2013, 37 (3) : 590-596.

[6] Qian K, Zhou C, Allan M. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (2) : 802-810.

[7] 李闯, 陈民铀, 付昂, 等. 含风电场的配电网无功优化策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (9) : 100-105.

[8] 杨宁, 文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (14) : 23-27.

[9] 郭效军, 蔡德福. 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (12) : 85-90.

[10] 丁晓群, 王艳华, 臧玉龙, 等. 基于内点法和改进遗传算法的无功优化组合策略 [J]. 电网技术, 2008, 32 (11) : 45-49.

[11] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss, reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (2) : 1041-1047.

(收稿日期: 2015-03-02) EA