

DOI: 10.7667/PSPC170332

考虑电动汽车接入的分布式电源出力优化

张忠会, 胡国宝, 李瑞欣

(南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘要: 分布式发电(DG)具有自由灵活的特点, 其供电能力受自然环境的影响较大。大规模电动汽车(EV)接入配网导致电能质量严重下降, 迫切需要进行及时消纳。这对配网中分布式发电的合理调度提出了更高的要求。建立了考虑电动汽车接入的分布式电源出力多目标优化模型, 以电压波动最小和新增网损最小为目标, 对分布式电源日出力进行动态调整。结果表明, 该优化模型平抑了电压波动, 降低了电压越界风险, 同时能够改善经济性。算例采用标准节点系统进行仿真, 对考虑经济性优化、单目标电压优化、不优化三种模式的效果作了比较分析。

关键词: 电动汽车; 分布式电源; 出力优化; 电压波动

Optimization of distributed generation output in electric vehicles integrating into distribution network

ZHANG Zhonghui, HU Guobao, LI Ruixin

(Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The Distributed Generation (DG) is of flexibility. Its capability in supplying power is greatly affected by natural environment. A large scale of Electric Vehicles (EV) accessed to distribution network cause serious decline of power quality, therefore it is urgent to absorb the added load timely, which raises a higher demand on the reasonable generation dispatch for distributed generation. This paper establishes a multi-objective optimization model for the generation output of DG considering the access of EV, which takes the minimum fluctuation of voltage and the minimum added power network loss as the objectives to dynamically adjust DG daily output. The result shows that the model smooths the voltage fluctuation, reduces the risk of voltage violation, and meanwhile improves the economic efficiency. The standard node system is simulated as an example, and the effects of three models of considering economic optimization, single-objective optimization and no optimization are compared and analyzed.

Key words: electric vehicles; distributed generation; output optimization; voltage fluctuation

0 引言

随着第三次工业革命的来临, 以大规模可再生能源开发利用、大规模分布式设备接入和交通系统电气化等为主要特征的能源互联网成为发展趋势。2016年最新投入实施的《中华人民共和国大气污染防治法》条例中规定, 鼓励节能环保新能源机动车的推广应用, 同时要求优先安排清洁能源发电入网^[1]。如今, 大规模电动汽车接入配电网, 将进一步加剧原配网中由分布式能源发电间歇性引起的电压波动, 影响电网安全稳定运行, 同时产生谐波污染, 降低配网电能质量, 增加电能损耗, 削弱电网运行经济性。因此对考虑电动汽车接入下配网中分布式电源出力调度问题的研究具有重要意义。

当前, 在电动汽车入网问题上, 国内外学者已

经做了多方面的研究。在电动汽车模型方面, 文献[2]通过对不同类型电动汽车在充电行为、充电方式等方面的需求进行分类, 经过抽取、计算, 建立了电动汽车充电模型。在电动汽车应对策略方面, 文献[3]着重考虑电动汽车的行为特征, 对其负荷进行最优分配, 实现了削峰填谷。文献[4]运用粒子群算法得到了V2G模式下含电动汽车配网的馈线重构方案, 改善了重构后的调度性能。文献[5]综合充电费用与网络负荷波动的多目标优化, 以实现对供电质量与用户利益的双重保障。在电动汽车与其他电网设备的协调控制方面, 文献[6]提出一种分层控制的架构, 对含电动汽车配电网与站级间的控制策略做了说明。文献[7]对充电站布局问题的非确定性制定了四种可适应解决方案。文献[8]以换电站最大收益为研究对象, 建立了换电站最优充放电模型, 对

换电站的运营、管理具有参考价值。文献[9]研究了换电站充电调度的优化,重点改善负荷峰谷差问题,得到了次日各时段最优调度策略。随着现代电力系统的发展,越来越多的分布式发电接入电网,参与能量管理^[10-11]。文献[12]论述了对风、光等间歇性可再生能源和接入配电网电动汽车负荷实行联合调度的可能性。结论表明,分布式电源与电动汽车的协同消纳,能够提高电网对清洁能源的接纳能力与接纳效率,并提升电网的电压稳定性。文献[13-15]对风电与电动汽车协同调度的用户收益、运行成本、节能减排效益等做了研究。文献[16]提出将集中控制器作为纽带,通过预测电动汽车的负荷,加强对风机机组联合调度合理性的控制。文献[17-18]综合考虑购电成本与能量管理,对光伏发电与电动汽车的协同效果做了研究。上述研究中多数未考虑不同分布式电源之间出力的协同策略。

本文对配网中的新增电动汽车负荷的消纳问题,采用粒子群算法,以电网电压波动最小和网络损耗最小为目标,协同各时段不同分布式设备的运

行,得到该时段分布式电源的最优出力计划,以保护系统安全运行,同时使系统能量达到一种符合经济性的优化平衡。

1 EV 和 DG 模型

1.1 电动汽车模型

电动汽车是近年来发展迅猛的一类绿色出行工具,其主要类型有出租车、公交车、私家车和公务车。受运营制度、家庭作息时间的影 响,不同类型电动汽车的充电需求与其充电地点、充电接入时间、起始充电 SOC 曲线和充电电池容量等因素有关。通过对相关因素进行合理假设,采用蒙特卡洛抽样方法抽取同一时间段不同类型电动汽车中单台电动汽车的充电需求,累加即可得到该时间段电动汽车总负荷。

本文模型中电动汽车的规模假设为 600 辆,参考文献[2]中电动汽车相关影响因素的参数设置,在不考虑充电时长限制的情况下,对模型中的参数设置如表 1。

表 1 电动汽车负荷模型参数设置

Table 1 Parameter setting of EV load model

车辆种类	渗透率	充电次数(每天)	充电接入期望时间点	充电概率	起始充电容量分布	起始充电时间分布	充电地点
公交车	0.011 8	2	12:00	1	$N(0.5,0.1^2)$	均匀分布	快充充电桩
			0:30	1	$N(0.5,0.1^2)$	均匀分布	快充充电桩
出租车	0.028 2	2	2:00	1	$N(0.3,0.1^2)$	均匀分布	单位
			11:30	1	$N(0.3,0.1^2)$	均匀分布	快充充电桩
公务车	0.121 3	1	18:00	1	$N(0.4,0.1^2)$	均匀分布	单位
			19:00	0.7	$N(0.6,0.1^2)$	均匀分布	居民
私家车	0.838 7	1	7:00	0.3	$N(0.6,0.1^2)$	均匀分布	商场

1.2 分布式电源模型

1.2.1 风力发电模型

风力发电主要是通过风机对自然风机械能的转换产生。转换中,风机输出功率取决于自然风风速。转换后,输出功率 P_w 的模型^[19]为

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < V_{ci} \\ (A + Bv + Cv^2)P_r & V_{ci} \leq v < V_r \\ P_r & V_r \leq v < V_{co} \\ 0 & v \geq V_{co} \end{cases} \quad (1)$$

模型中,

$$A = \frac{V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4V_{ci}V_r \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right)^3}{(V_{ci} - V_r)^2} \quad (2)$$

$$B = \frac{-(V_{ci} + V_r) + 4(V_{ci} + V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right)^3}{(V_{ci} - V_r)^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (4)$$

式中: v 为自然风风速; V_r 为风机额定风速; V_{ci} 、 V_{co} 分别为风机的切入风速、切出风速; 多项式 A 、 B 、 C 为风机出力非线性部分的拟合系数。

模拟风速的分布模型有许多,本文选取精度较高的威尔逊分布^[19]进行建模,所得到风速 v 的概率密度函数 $f(v)$ 及其概率分布 $F(v)$ 分别为

$$f(v) = \frac{s}{l} \left(\frac{v}{l}\right)^{s-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{l}\right)^s\right] \quad (5)$$

$$F(v) = U = 1 - \exp\left(-\frac{v}{l}\right)^s \quad (6)$$

式中, s 、 l 分别为威尔逊分布的形状参数、尺度参数。

反演式(6),经过等价变换,得到模拟自然风风速为

$$v = -l(\ln U)^{1/s} \quad (7)$$

目前风电场机组多为双馈类型,具有一定的无

功调节能力, 可等效为恒功率因数的 PQ 节点进行处理。等效后, 风机的无功出力为

$$Q = P \tan \varphi \quad (8)$$

式中, φ 为功率因数角, φ 处于第一、四象限时, 风机分别处于发出无功、吸收无功的运行状态。本文通过蒙特卡洛方法对风速进行抽取模拟, 模拟时参数设置如下: 额定风速为 14 m/s, 切入风速为 4 m/s, 切出风速为 25 m/s, 风机的额定输出为 20 kW。

1.2.2 光伏发电模型

光伏发电是一种利用光伏效应将太阳能转化为电能的清洁发电方式。其输出功率 P_s 与地区自然环境下的光照强度 E 、单块光伏板面积 D 和光能转换效率 η 直接相关, 光伏发电的出力模型^[20]为

$$P_s = ED\eta \quad (9)$$

自然状态下, 一定时间段内, 光照强度 E 近似符合贝塔分布, 其概率密度函数 $f(E)$ 与概率分布函数 $F(E)$ 分别为

$$f(E) = \frac{\Gamma(\lambda + \mu)}{\Gamma(\lambda)\Gamma(\mu)} \left(\frac{E}{E_m}\right)^{\lambda-1} \left(1 - \frac{E}{E_m}\right)^{\mu-1} \quad (10)$$

$$F(E) = \frac{\Gamma(\lambda + \mu)}{\Gamma(\lambda)\Gamma(\mu)} \int_0^{E/E_m} t^{\lambda-1} (1-t)^{\mu-1} dt \quad (11)$$

式中: E_m 为光照强度最大值; λ 、 μ 为贝塔分布的形状参数。

反演式(11), 得到模拟光照强度为

$$E = E_m F^{-1}(E) \quad (12)$$

通常, 光伏发电作为有功电源并入电网。本文通过蒙特卡洛方法对光照强度进行抽取, 抽取时参数设定如下: 单块光伏板的面积为 19.81 m², 最大光照强度为 1 000 W/m², 光能转换效率为 0.15。

2 EV 与 DG 入网协同出力优化模型

电动汽车与分布式电源通常以分散接入的方式接入配网, 对接入点电压及其所在馈线的损耗产生直接影响。对于电动汽车单独接入配网, 随着接入规模的增大, 可能引起配电网负荷的局部突出, 加大接入点及其后节点电压越限的可能性, 产生电网运行安全隐患。同时, 未能及时消纳的负荷会增加线路传输功率, 引起更大的线路损耗, 不利于电网的经济运行。对于分布式电源单独接入配网, 能够对接入点的负荷直接消纳, 对接入点及附近节点电压的升高效果较为明显。在入网的间歇性方面, 电动汽车受用户行为模式的影响, 接入配网时所产生的负荷具有随机性和不确定性的特点, 而分布式电源的接入则受到不同地域自然属性的影响。二者的同时入网容易引起电网较大波动, 影响电网安全、

经济运行。

2.1 目标函数

本文所建立优化模型的总目标综合对电网运行安全性、经济性的考虑, 对分布式电源的出力进行优化调度, 促进对电动汽车负荷消纳效果的改善。其中, 安全性将作为首要原则分配其权重。优化总目标涉及电压波动与网络损耗两方面, 其模型为一个多目标、多约束、非线性的函数, 现对总目标描述如下。

以电压波动最小为目标, 则

$$f_1 = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \left| \frac{V_i - V_{ispe}}{V_{ispe}} \right| \quad (13)$$

式中: N_B 为节点数; V_i 为节点 i 的电压; V_{ispe} 为节点 i 的期望电压, 即未接入电动汽车与分布式电源时的标准电压。

以系统网损最小为目标, 则

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{I_i^2 R_i - I_{ispe}^2 R_i}{I_{ispe}^2 R_i} = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{I_i^2 - I_{ispe}^2}{I_{ispe}^2} \quad (14)$$

式中: I_i 为节点 i 的注入电流; I_{ispe} 为节点 i 注入电流的期望值, 即未接入电动汽车与分布式电源时的标准电流; R_i 为线路 i 的电阻。

模型中的总目标为上述 f_1 、 f_2 两个单目标合并转换的多目标函数。通常, 多目标优化问题可转化为单目标优化问题进行处理。对目标函数 f_1 、 f_2 进行规范化处理后, 选用线性加权法对其各自权重部分进行叠加, 即可得到总目标为

$$f(x) = \lambda_1 f'_1 + \lambda_2 f'_2 \quad (15)$$

式中: f'_1 、 f'_2 分别为目标函数 f_1 、 f_2 经 mapminmax 函数归一化处理后的结果; λ_1 、 λ_2 分别为目标函数 f_1 、 f_2 的权重系数, 满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 当 λ_1 为 1 时, $f(x)$ 为单目标电压优化, 当 λ_1 为 0 时, $f(x)$ 为单目标网损优化。

2.2 等式约束

对接入电动汽车与分布式电源的配网, 常用前推回代法计算其潮流, 最终系统各节点的潮流满足潮流方程的一般形式。

$$P_i + jQ_i = \dot{V}_i \sum_{j=1}^{N_B} \dot{Y}_{ij}^* \dot{V}_j \quad (16)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率、无功功率; \dot{V}_i 为节点 i 电压的复数形式; \dot{V}_j 为节点 j 电压的共轭复数形式; \dot{Y}_{ij} 为节点 i 、 j 之间导纳的共轭复数形式。

整个配网系统满足能量守恒。

$$\begin{cases} P_w + P_s + P_G = P_{\text{loss}} + P_L \\ Q_w + Q_G = Q_{\text{loss}} + Q_L \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_w 、 Q_w 分别为风力发电的有功功率、无功功率; P_s 为光伏发电的有功功率; P_G 、 Q_G 分别为系统电源的有功功率、无功功率; P_{loss} 、 Q_{loss} 分别为系统网络损耗的有功功率、无功功率; P_L 、 Q_L 分别为系统负荷的总有功功率、总无功功率。

2.3 不等式约束

接入系统分布式电源的发电能力受当地气候的影响, 在进行分布式电源出力调整时, 必须考虑其自然属性的约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_w \leq P_{w\text{max}} \\ 0 \leq Q_w \leq Q_{w\text{max}} \\ 0 \leq P_s \leq P_{s\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{w\text{max}}$ 、 $Q_{w\text{max}}$ 分别为地区自然环境下、特定时间内风力发电的最大有功功率、最大无功功率; $P_{s\text{max}}$ 为地区自然环境下、特定时间内光伏发电的最大有功功率。

2.4 优化方法

配电网中分布式电源的出力优化问题是一个多维度、非线性的动态优化问题, 线性规划、整形规划等传统方法已不再适用。本文采用粒子群算法进行优化求解。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种由鸟类捕食研究发展而来的智能优化算法。该算法模仿鸟类捕食中互相协作、信息共享的行为模式, 在初始化系统随机解的基础上, 通过不断迭代, 在搜索空间内进行最优解的局部搜索与全局搜索, 最终达到最优解不间断优化的目的。其详细过程此处不再赘述。

2.5 模型求解流程

优化模型的求解流程图如图 1。

3 算例仿真

3.1 配网结构

仿真算例采用 33 节点标准配电系统, 其接线图见图 2。系统特性如下: 系统电压为 12.66 kV, 总容量为 10 MW, 共有 32 条支路, 系统总负荷为 3715+j2300 kVA。假设系统中现有的分布式能源为风电与光伏发电两种, 总装机渗透率为 26.7%, 且以风电为主。其中, 风电与光伏发电的容量比为 2:1。

站址选取上, 光伏电站址为节点 21、23, 风电站址为节点 10、16、32。

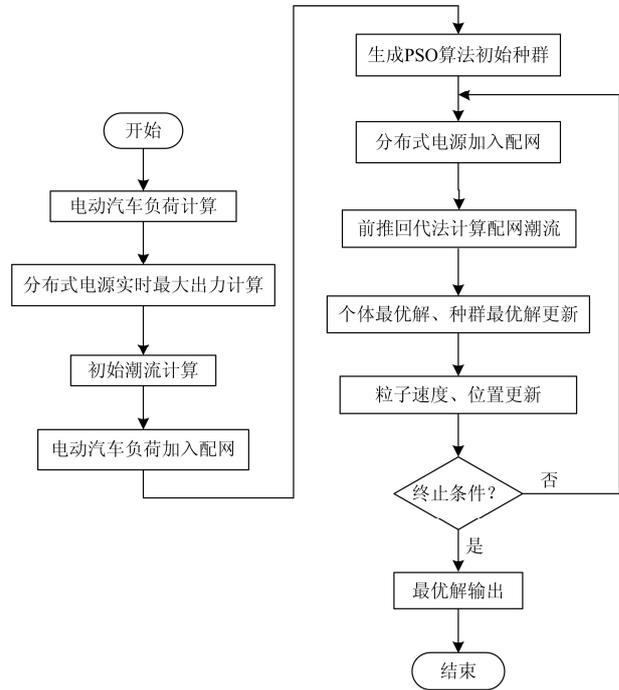


图 1 模型求解流程图

Fig. 1 Flow chart of model solving

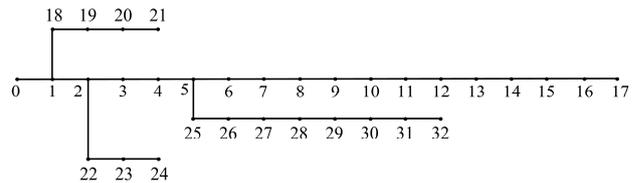


图 2 IEEE33 节点配电系统接线图

Fig. 2 Wiring diagram of 33-node distribution system

将电动汽车负荷模型接入上述系统, 可得到配电网有功功率日负荷曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 电动汽车负荷在 2、13、14、21、22 五个时段较为集中, 且其大小顺序从高到低依次为 2、13、21、22、14。

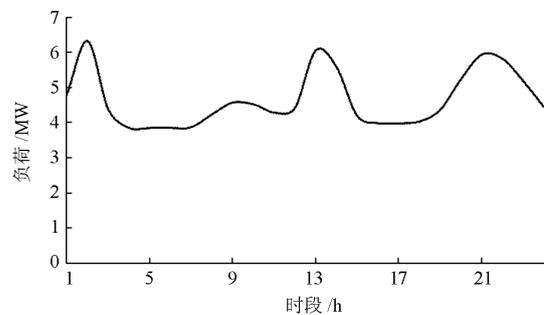


图 3 配电网有功功率日负荷曲线

Fig. 3 Daily load curve of active power in distribution network

通过对风力发电、光伏发电进行模拟, 可得到

配电网中分布式能源的最大有功发电如图 4 所示。

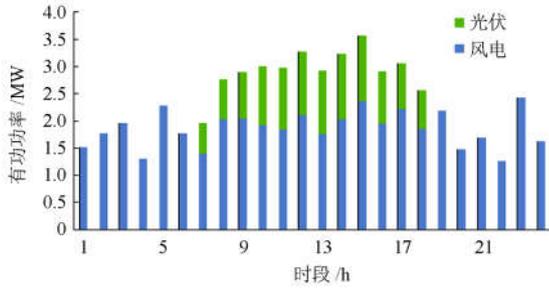


图 4 分布式能源有功功率
Fig. 4 Active power of DG

3.2 仿真结果与分析

进行仿真时,对 PSO 算法的参数设置如下:粒子群规模为 10 个,单个粒子维度为 8 维,迭代最大次数为 1 000,加速常数 1、加速常数 2 均为 2。初始惯性权重为 0.9,最终惯性权重为 0.4,多目标权重 λ_1 为 0.9, λ_2 为 0.1。研究模型中,选取 20、11、14、28、24 五节点作为电动汽车的集中接入点,按照 1:2:3:2:1 的比例接入负荷。

仿真得到的分布式电源出力计划见表 2。将其优化效果与不做任何优化、单目标电压优化两种模式的效果做以下比较分析。

表 2 分布式电源出力计划

Table 2 Generation plan of DG

节点	出力属性	功率/MW																							
		1时段	2时段	3时段	4时段	5时段	6时段	7时段	8时段	9时段	10时段	11时段	12时段	13时段	14时段	15时段	16时段	17时段	18时段	19时段	20时段	21时段	22时段	23时段	24时段
16	风机有功	0.12	0.26	0.26	0.01	0.76	0	0.47	0.15	0.25	0.06	0.05	0.05	0.58	0.20	0.14	0.08	0	0.09	0.02	0.18	0.57	0.42	0.12	0.02
	风机无功	0.07	0.16	0.16	0.01	0.47	0	0.29	0.09	0.15	0.03	0.03	0.03	0.36	0.12	0.09	0.05	0	0.06	0.01	0.11	0.35	0.26	0.07	0.01
21	光伏有功	0	0	0	0	0	0.01	0.10	0.17	0.15	0.11	0.13	0.47	0.35	0.10	0.05	0.00	0.06	0	0	0	0	0	0	
	风机有功	0	0.38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.08	0	0	0	0	0	0.09	0.15	0.42	0	0	
10	风机有功	0	0.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.05	0	0	0	0	0	0.05	0.09	0.26	0	0	
	风机无功	0	0.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.05	0	0	0	0	0	0.05	0.09	0.26	0	0	
32	风机有功	0.50	0.59	0.05	0.07	0	0.59	0	0.04	0.06	0.43	0.27	0.37	0.21	0.67	0.04	0.03	0.74	0.03	0.45	0.49	0.22	0.13	0.81	0.52
	风机无功	0.31	0.37	0.03	0.04	0	0.37	0	0.03	0.04	0.27	0.17	0.23	0.13	0.42	0.02	0.02	0.46	0.02	0.28	0.30	0.13	0.08	0.50	0.32
23	光伏有功	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0.28	0.05	0.06	0.05	0.59	0.42	0.16	0.09	0	0.10	0	0	0	0	0	
	风机有功	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0.28	0.05	0.06	0.05	0.59	0.42	0.16	0.09	0	0.10	0	0	0	0	0	

1) DG 渗透率分析

配网中电动汽车的接入具有随机性,意味着出力优化的进行是动态的。则在分布式电源出力得到优化的同时,系统主网的发电也会受到一定影响。图 5 为分布式电源出力优化后得到的渗透率曲线,图 6 为相应时段的主网有功出力曲线。表 3 为三种模式下各时段损耗情况。结合图 3、图 6 可以看出,未优化模式下,全力投入的分布式电源对主网的出力起到了减负消纳的作用,特别是在 13、14 时段,由于分布式电源出力充足,主网出力大大减小,趋于平稳。随着分布式电源出力的变动,主网出力

变化频繁,不利于电网安全稳定运行。与之相比,其他两种模式中, DG 渗透率曲线跟踪电动汽车负荷曲线波动,起到了平衡负荷的作用,说明了粒子群算法优化的有效性。其中,单目标电压优化中,在 2、21、22 时段,由于分布式电源发电不足,主网的出力受到影响而产生波动。其余时段,主网的出力波动不大,较为平稳。相比于单目标电压优化,考虑经济性模式下,分布式电源渗透率在 5-7、14、17 时段下的渗透率明显突出,相应时段的主网出力有所减小。结合表 3 中的损耗明细可知,在这些时段中,增加的分布式能源的出力大大改善了相应时段的损耗状况。

表 3 电网各时段损耗

Table 3 Loss of power system in every period

优化模式	功率/MW																							
	1时段	2时段	3时段	4时段	5时段	6时段	7时段	8时段	9时段	10时段	11时段	12时段	13时段	14时段	15时段	16时段	17时段	18时段	19时段	20时段	21时段	22时段	23时段	24时段
单目标	0.21	0.27	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.21	0.20	0.21	0.26	0.24	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.23	0.25	0.26	0.21	0.20
考虑经济性	0.21	0.26	0.21	0.19	0.12	0.12	0.14	0.20	0.21	0.20	0.20	0.19	0.25	0.20	0.20	0.20	0.12	0.20	0.19	0.23	0.28	0.26	0.20	0.19

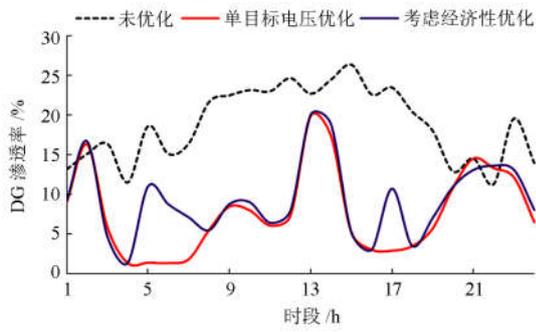


图 5 DG 渗透率曲线

Fig. 5 DG penetration level curve

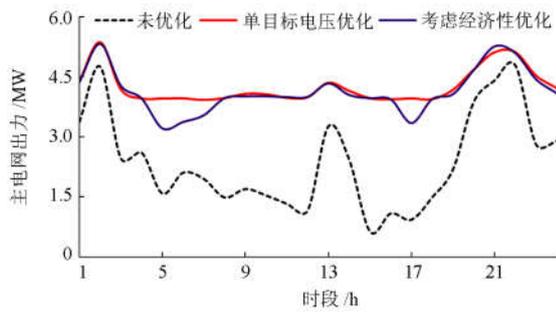


图 6 主电网发电曲线

Fig. 6 Power curve of main grid

2) 电压分析

图 7 为节点电压日平均波动情况。由图 7 可知, 单目标电压优化下系统节点电压波动较为平稳, 考虑经济性模式次之, 不做任何优化时系统电压波动较为剧烈。

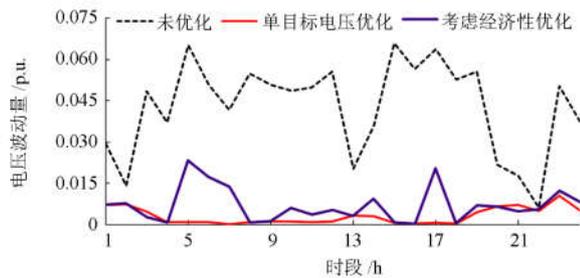


图 7 节点电压日平均波动

Fig. 7 Daily average fluctuation of node voltage

三种模式下节点电压日波动上限、下限情况如图 8、图 9 所示。从图中可以看出, 三种模式下的电压日波动均处于正常范围, 但其各自的优化效果对电压上限的影响差别较大。其中, 图 8 显示: 不做任何优化时, 由于分布式能源全部投入, 电网的供电能力急剧抬升, 部分节点电压过高, 逼近正常运行时的电压上限; 单目标优化时, 少部分节点电

压的上限值有所提升, 其升高幅度相对不大; 考虑经济性模式下, 多数节点的日电压上限均有小幅度升高。图 9 显示, 三种模式下的电压日波动下限均接近期望(即标准节点系统正常运行时的电压下限)。

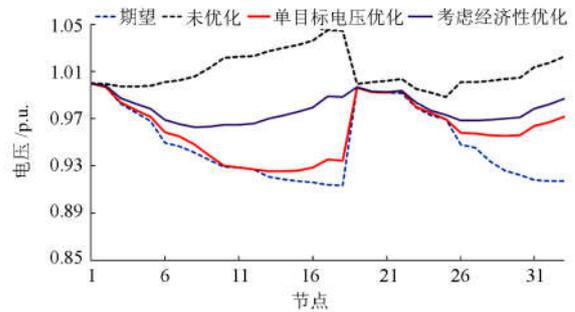


图 8 各节点电压日波动上限

Fig. 8 Daily fluctuation upper limit of each node voltage

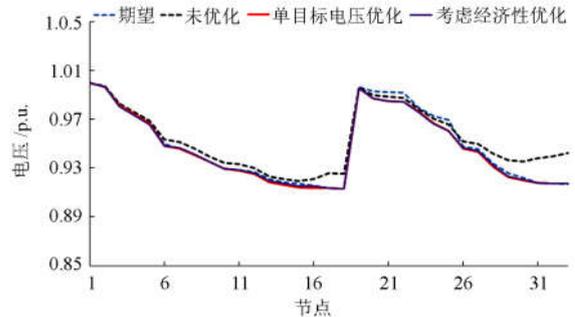


图 9 各节点电压日波动下限

Fig. 9 Daily fluctuation lower limit of each node voltage

表 4 为日节点电压越界情况。综合表 4、图 8 和图 9 可知, 相对于考虑经济性优化, 单目标电压优化下由于优化目标中加强了对压差的约束, 反而加剧了节点在期望电压下限附近的越界趋势。

表 4 节点电压日越界情况

Table 4 Node voltage daily violation ratio

优化模式	平均越界率/%	最大越界率/%
未优化	0	0
单目标电压优化	14.1	18.2
考虑经济性优化	8.8	15.2

3) 网损分析

由表 5 中三种模式下的网损情况可知, 不同模式下的最大损耗相差不大。相对于单目标电压优化, 考虑经济性模式下, 系统网损有一定程度的降低, 约 8.37%, 说明多目标下的优化起到了明显效果。结合图 6 可知其原因是, 考虑经济性模式下, 分布式电源就近增加发电, 补偿了主电网电源远距离传输的损耗。

表 5 系统的网络损耗
Table 5 Line loss of grid

优化模式	平均损耗波动/%	最大损耗/MW
未优化	-67.79	0.238
单目标电压优化	11.96	0.266
考虑经济性优化	3.59	0.277

4) 模式选择

对于接入配网电动汽车负荷的消纳，首先必须满足对供电质量的保证，要求电压波动处于正常范围，波动尽可能小且电压越界次数尽可能少，其次考虑到经济性，可以通过选取适当的调度模式使电网的运行成本得到降低。综合考虑下，未优化模式电压失衡严重，单目标电压优化与考虑经济性优化模式中，优化后电压波动均处于正常范围，且波动大小偏差不大，而后者电压越界明显小于前者，并在经济性上有所改善，因此在满足电能质量的前提下，后者更具优先参考的价值。

4 结论

1) 本文研究了大规模电动汽车接入配电网后的负荷消纳问题，建立了考虑电动汽车接入配网的分布式电源出力优化模型，解决了由新增负荷引起的电能质量下降和经济性降低的问题。

2) 以标准节点系统为例，比较了三种分布式电源出力模式对配网消纳问题的解决效果。实验结果表明：在满足电能质量的要求下，采用考虑经济性的模式能够改善电压最低越界情况，并增加系统经济性。

3) 文中所建电动汽车模型仅考虑了其负荷特性与充电行为，暂未考虑其储能特性与放电行为。对同时考虑两种行为下的分布式电源出力优化问题有待继续深入研究。

4) 考虑经济性模式下，各单目标权重的最优选择取决于实际电网的具体要求。如何得到各单目标最优权重的问题还有待研究。

参考文献

[1] 第十二届全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国大气污染防治法[Z]. 2015.
The Standing Committee of the National People's Congress. Atmospheric pollution prevention and control law of the People's Republic of China[Z]. 2015.

[2] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J].

Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.

[3] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.

[4] KAVOUSI-FARD A, ABBASI A, ROSTAMI M A, et al. Optimal distribution feeder reconfiguration for increasing the penetration of plug-in electric vehicles and minimizing network costs[J]. Energy, 2015, 93: 1693-1703.

[5] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.

[6] 杨冰, 王丽芳, 廖承林, 等. 电动汽车与分布式电源协同有序控制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 419-426.
YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin, et al. Study of coordinated charging control for electric vehicles in correlation with distributed power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 419-426.

[7] LAM A Y S, LEUNG Y W, CHU X. Electric vehicle charging station placement: formulation, complexity, and solutions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2846-2856.

[8] 孙伟卿, 王承民, 曾平良, 等. 基于线性优化的电动汽车换电站最优充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 21-27.
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. An optimal charging/discharging strategy for electric vehicle battery swapping stations based on linear optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 21-27.

[9] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 基于自适应变异粒子群算法的电动汽车换电站充电调度多目标优化[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 25-29.
TIAN Wenqi, HE Jinghan, JIANG Jiuchun, et al. Multi-objective optimization of charging dispatching for electric vehicle battery swapping station based on adaptive mutation particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 25-29.

[10] ZHENG Dehua, Abinet Tesfaye Eseye, ZHANG Jianhua

- and LI Han. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [11] LI Han, Abinet Tesfaye Eseye, ZHANG Jianhua and ZHENG Dehua. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [12] 王斐, 李正烁, 叶萌, 等. 电动汽车充电对电网的影响及其优化调度研究述评[J]. 南方电网技术, 2016, 10(6): 70-80.
WANG Fei, LI Zhengshuo, YE Meng, et al. Review on research of impact of electric vehicles charging on power grids and its optimal dispatch[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 70-80.
- [13] 于大洋, 黄海丽, 雷鸣, 等. 电动汽车充电与风电协同调度的碳减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 14-18.
YU Dayang, HUANG Haili, LEI Ming, et al. CO₂ reduction benefit by coordinated dispatch of electric vehicle charging and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 14-18.
- [14] 刘东奇, 王耀南, 袁小芳. 电动汽车充放电与风力/火力发电系统的协同优化运行[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 18-26.
LIU Dongqi, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang. Cooperative dispatch of large-scale electric vehicles with wind-thermal power generating system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 18-26
- [15] 吴泓俭, 雷霞, 刘斌, 等. 基于遗传膜算法的含风电机组和电动汽车的配电网分段动态重构[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 196-205.
WU Hongjian, LEI Xia, LIU Bin, et al. Membrane computing based genetic algorithm for dynamic reconfiguration of distribution network with dividing time and considering electric vehicles and wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 196-205.
- [16] 汪春, 吴可, 张祥文, 等. 规模化电动汽车和风电协同调度的机组组合问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 41-48.
WANG Chun, WU Ke, ZHANG Xiangwen, et al. Unit commitment considering coordinated dispatch of large scale electric vehicles and wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 41-48.
- [17] 路欣怡, 刘念, 陈征, 等. 电动汽车光伏充电站的多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 46-56.
LU Xinyi, LIU Nian, CHEN Zheng, et al. Multi-objective optimal scheduling for PV-assisted charging station of electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 46-56.
- [18] 苏粟, 蒋小超, 王玮, 等. 计及电动汽车和光伏-储能的微网能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 164-171.
SU Su, JIANG Xiaochao, WANG Wei, et al. Optimal energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 164-171.
- [19] CHOU K C, COROTIS R B. Simulation of hourly wind speed and array wind power[J]. Solar Energy, 1981, 26(3): 199-212.
- [20] 来媛. 大规模新能源发电容量可信度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LAI Yuan. Research on capacity credit of large-scale renewable energy sources[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

收稿日期: 2017-03-16; 修回日期: 2017-05-28

作者简介:

张忠会(1962—), 男, 教授, 研究方向为电力系统自动检测与控制及系统规划等; E-mail: 18979118968@163.com

胡国宝(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动检测与控制等; E-mail: 942094975@qq.com

李瑞欣(1994—), 男, 硕士研究生, 助教, 研究方向为电力系统自动检测与控制等。E-mail: 1332681096@qq.com

(编辑 魏小丽)