

考虑储能的地区电网有功和电压联合控制策略研究

罗金山¹, 周泊宇², 张 艳¹, 艾 欣²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

Joint Control Strategy Study of Active Power and Voltage in Regional Power Network Considering Energy Storage

LUO Jinshan¹, ZHOU Boyu², ZHANG Yan¹, AI Xin²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

摘 要: 由于分布式新电源的间歇性和波动性, 地区电网的功率波动和电压波动问题凸显。为解决这一问题, 本文提出一种考虑储能设备的联合控制策略, 首先建立以电网功率波动最小为目标函数的数学模型, 然后通过改进粒子群算法进行求解, 以此来控制储能的出力, 使得地区电网的功率波动最小, 并通过储能系统荷电状态反馈控制, 保证储能设备不会过度充放电。通过潮流计算得到风电接入时母线的电压波动, 选取波动较大的时段, 在该母线上进行离散无功补偿, 进一步对电压波动进行调节。最后通过 IEEE14 节点算例进行仿真, 在电网中接入风电和储能装置, 同时在风电接入母线配置离散无功补偿设备, 在完整的一个调度周期内, 对比储能不出力和不采用离散无功补偿策略情况下的功率波动和电压波动, 表明联合控制策略的有效性。

关键词: 新能源; 储能; 粒子群算法; 离散无功补偿

Abstract: Because of the intermittent and fluctuation of the distributed renewable power generation, the power fluctuation and voltage fluctuation of the distribution network are serious. In order to solve this problem, a joint control strategy considering energy storage equipment is proposed in this paper. Firstly, the mathematic model with the minimum power fluctuation as the objective function is established, and then the particle swarm optimizer is used to control the energy output, which makes the distribution network power fluctuations minimum. Through the feedback control strategy of charge state for energy storage system, the energy storage equipment will not be excessively charged and discharged. Because the power flow calculation is used to ob-

tain the voltage fluctuation on the access bus of the wind power, the periods that voltage fluctuates greatly are selected. And discrete reactive power compensation is carried out on the bus to further adjust the voltage fluctuation. Finally, the IEEE14-bus distribution network is taken as case, in which the wind power and an energy storage device are connected to the distribution network, and the discrete reactive power compensation equipment is arranged on the access bus of the wind power. In addition, power fluctuations and voltage fluctuations are compared in the case of no storage output or no discrete reactive power compensation in one scheduling period, which shows the validity of joint control strategy.

Keywords: new energy; energy storage; particle swarm optimization algorithm; discrete reactive power compensation

0 引 言

由于传统化石能源的消耗殆尽, 以及燃烧化石能源带来的环境问题, 人们不断探索使用风电、太阳能作为新的电能形式。但由于风电、光伏的出力具有很强的波动性和不确定性, 使得电力系统的稳定运行面临严峻挑战^[1]。近年来, 为了提高新能源电源的可调度性, 人们开始尝试使用储能设备来稳定风电场和光伏电站的功率波动^[2]。因此, 对于如何控制和配置储能, 也成为目前研究的热门方向。

目前较为常见的控制策略有, 预先设定多个储能系统的工作模式, 通过实际功率或电压值与参考值的比对, 选择进入哪种工作模式。文献 [3] 基于风储孤岛系统, 为储能设备设定了 5 种工作模

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900500)

式,通过直流母线电压值选择储能设备工作模式,达到对电网功率波动进行调节的目的。文献[4]使用混合储能设备,根据不同的母线电压,考虑设备的使用特性,选择不同的工作模式,使得蓄电池或超级电容既可独立工作,也可协调工作。文献[5]以消纳风电资源为主要目标,利用储能设备平抑波动,但只考虑了风电功率的波动,未考虑负荷的变化情况。由于储能设备通常经换流器接入电网,因此也可通过控制换流器,对储能设备进行控制。文献[6]考虑光伏发电系统,通过换流器对输送的有功或无功功率进行控制,达到调节电网电压、频率的目标。文献[7]预先设定好几种工作模式,根据风电出力情况,利用储能设备对电网进行调节,通过换流器连接使出力稳定持续。文献[8]设计了一种分层控制策略,在传统集中控制的基础上,增加了分布控制,在故障时开启,保持系统稳定运行。文献[9]将储能设备与风电机组配合使用,协同常规发电机组,共同承担一次调频任务,但主要考虑电网频率问题,对电压波动关注不够。文献[10]考虑暂态情况时,因负荷下降导致系统频率变化的情况,通过储能设备保证系统的稳定运行。文献[11]以有功损耗最小建立目标函数,使用快速非支配排序遗传算法求解,以此对储能的工作方式进行控制,但只考虑了日负荷变化情况,没有考虑新能源电源接入电网后带来更大的波动。文献[12]利用改进粒子群算法对选址定容的优化多目标问题进行求解,但未考虑储能设备的控制策略。

2008年国际大电网会议首次提出了主动配电网(active distribution network, ADN)的概念^[13],随后各国都对主动配电网的控制策略进行了深入研究。文献[14]提出一种分区分布式无功控制方法,利用二阶锥松弛技术,对主动配电网进行建模,改善了传统的无功电压控制策略。但文中对有功功率波动的问题,未做出太多研究。文献[15]通过对分布式光伏电源、变压器分接头和电容器组等资源进行分类处理,制定多级调压策略,有效提高了调压效果。但文中没有充分考虑到,未来储能设备在主动配电网中的应用情况。文献[16]研究了未来主动配电网中补偿电容和储能设备的选址定容问题,考虑了综合成本、电网稳定性和温室气体排放量。但对负荷波动情况未作研究。文献[17]对主动配电网进行区域划分,建立区域控制器,实现了区域内协调控制算法。文献[18]使用启发式

策略的多目标和声搜索算法,对构建的主动配电网多目标日前优化调度模型进行求解,使得可再生能源能够实现跨区域消纳。

本文对含储能系统和大规模新能源接入的地区电网的功率和电压控制策略进行研究,对电网有功功率波动建立目标函数,将储能的出力作为控制变量,利用改进粒子群算法进行求解,减小电网的有功波动。在此基础上,应用离散无功补偿策略,减小新能源接入点的母线电压波动。引入荷电状态(state of charge, SOC)反馈控制,有效避免储能系统的过度充放电。最后,通过IEEE14节点的算例分析,验证这种联合控制策略的有效性,达到同时调节功率和电压的作用。

1 有功优化模型及离散无功控制策略

1.1 优化模型

随着地区电网的发展,将有大量的分布式能源接入,与传统的集中供电方式共同作为地区电网中电源。由于分布式电源存在较大的不确定性和间歇性,将给地区电网的稳定运行带来一定影响。随着储能设备的发展,人们发现储能设备具有一定的调节电网功率、电压波动的能力,通过对储能设备出力的控制,可以实现稳定地区电网功率、平抑电压波动的目的,有利于分布式电源接入电网。

1.1.1 目标函数

在地区电网中,选定一个节点,此节点的输出功率满足全网的用电要求,通过潮流计算,即可算出此节点的输出功率,计算公式如下所示:

$$P_1 = \sum_{j=1}^n \frac{R_{1j}(U_1^2 - U_1 U_j \cos \delta_j) - X_{1j} U_1 U_j \sin \delta_j}{R_{1j}^2 + X_{1j}^2} \quad (1)$$

式中:下标1为电网总功率注入点编号; P_1 为1节点的有功功率; j 为与1节点相连的节点编号,共有 n 个; R_{1j} , X_{1j} 为1节点到 j 节点线路的阻抗; δ_j 为 j 节点电压相角, U_j 为 j 节点电压幅值。

由于分布式电源的功率不容易准确预测,也就不容易直接考虑一个调度周期内功率的波动,所以可以使用滤波算法设定参考值,计算公式如下:

$$P_{1\text{ref}}(t) = (1 - \alpha)P_{1\text{ref}}(t - \Delta t) + \alpha P'_1(t) \quad (2)$$

式中: $P_{1\text{ref}}$ 为1节点参考值; α 为滤波系数; Δt 为功率采集时间间隔,本文中选择时间间隔为15min; P'_1 为无储能时1节点的有功出力,不考虑

负荷波动及新能源出力情况。

用实际值和参考值的差值实时表征功率波动情况，设 G 为目标函数，计算公式如下：

$$\min G(t) = |P_1(t) - P_{1ref}(t)| \quad (3)$$

由于本文在调节电压波动方面，主要考虑离散无功补偿策略，因此为了简化计算，目标函数只考虑有功功率。

1.1.2 约束条件

① 功率平衡约束

$$P_1 + P_{wind} + P_{bess} = P_{load} + P_{line} \quad (4)$$

式中： P_{wind} 为风力发电功率； P_{bess} 为储能出力，当其大于零时为放电，小于零时为充电； P_{load} 为全网负荷； P_{line} 为线路损耗的有功功率。

② 不等式约束

$$P_{min} \leq P_{bess} \leq P_{max} \quad (5)$$

$$U_{min} \leq U_i \leq U_{max} \quad (6)$$

式中： U_i 为节点电压，不能超过电压上限和下限；储能出力也需在功率上下限以内，通常， $P_{min} = -P_{max}$ ，数值等于额定功率，单位为 MW。

1.1.3 SOC 反馈控制

为避免储能设备过度充放电，并且不会超出额定容量，需考虑储能设备的荷电状态(SOC)，利用 SOC 进行反馈控制。当 SOC 较高时，储能系统应减小实际充电功率，当 SOC 较低时，储能系统应减小实际放电功率，计算方式如下：

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{P_{bess} \times \Delta t}{E} \quad (7)$$

$$P_{bess0} = k \times P_{bess} (P_{bess} > 0) \quad (8)$$

$$P_{bess0} = l \times P_{bess} (P_{bess} < 0) \quad (9)$$

式中： Δt 为时间间隔； E 为储能设备容量，单位为 MWh； P_{bess0} 为储能实际出力的有功功率； k 、 l 为充放电控制系数，与 SOC 有关，且考虑储能系统寿命，不可使其过度充放电，SOC 取值介于 10%~90% 区间， k 、 l 取值如图 1。

如图可知，当 SOC 小于 50% 时， k 值随 SOC 的减小而减小，放电功率减小；当 SOC 大于 50% 时， l 值随 SOC 增大而减小，充电功率减小。通过 SOC 反馈控制将储能系统荷电状态维持在较为合理的区间，避免储能设备过度充放电。

1.2 离散无功补偿策略

在电网中常需要并联电容器、电抗器来调节电压，因为其具有成本较低且容量较大的特点，但电抗器或电容器需要分组投切，且需要消耗较多的时

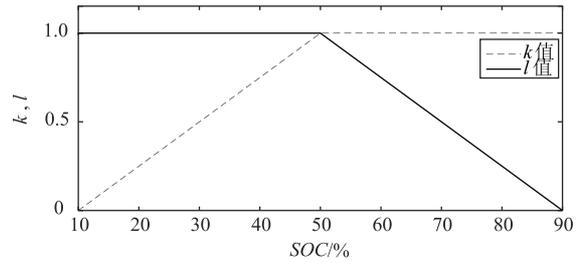


图 1 k 和 l 的取值

Fig. 1 Values of k and l

间进行操作，单日动作次数有限，因而被称为离散无功补偿设备^[19]。这些设备被配置于汇集站中。

在投切的时间段内，可利用灵敏度法计算离散无功补偿量，计算公式如下：

$$\Delta Q = INT\left(\frac{\Delta U}{S}\right) \quad (10)$$

式中： $INT\left(\frac{\Delta U}{S}\right)$ 为取整函数； S 为无功电压灵敏度系数，其计算方式参考文献 [20]。

当 ΔQ 大于零时，说明无功功率不足，需要投入电容器，退出电抗器；当 ΔQ 小于零时，说明无功功率过多，需要投入电抗器，退出电容器。使用前，需提前根据负荷特性及风电出力情况，设定投切时段，选择电压波动较大的时段，进行离散无功补偿。如发现 ΔQ 值超过设定的容量，按照额定容量进行补偿。其控制策略流程图如图 2。

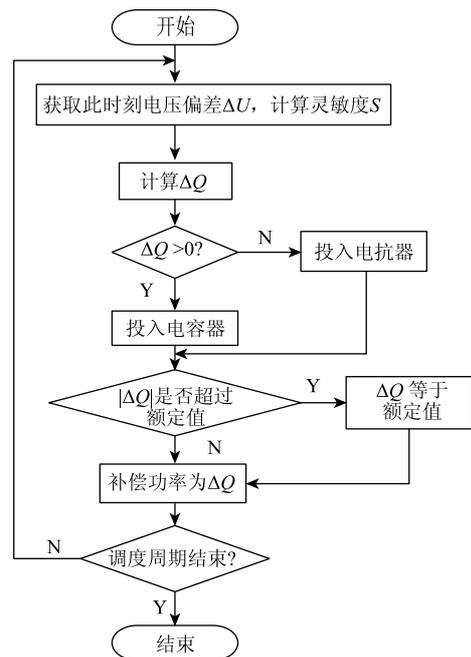


图 2 离散无功补偿策略流程图

Fig. 2 Flow chart of discrete reactive power compensation

2 模型求解

2.1 改进粒子群算法

粒子群优化 (particle swarm optimizer, PSO) 算法是 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种随机进化算法^[21], 其原理来自于鸟类飞行觅食的自然行为。由于这种算法编程简单, 参数较少, 收敛速度较快, 因此被广泛应用于电力系统优化计算方面。在该算法中, 每个粒子的位置都可看成需要求解的目标函数的一个解, 通过吸收自身和其他粒子的速度向量和位置向量的经验, 对自身的状态进行调整, 获得全局最优解^[22]。

在粒子群算法的实际应用中, 常会对其进行改进, 使其具有很好的收敛性能。主要做法为引入惯性因子, 并设计惯性因子的计算方法。本文考虑粒子和种群最优之间的差值, 根据差值来控制惯性因子 ω 的取值。当差值较小时, 说明该粒子与种群最优粒子的差距较大, 此时应增大 ω 值, 增强其搜索能力; 当二者差距较小时, 说明其搜索能力相对较好, 此时 ω 应减小。惯性权重具体计算公式如下:

$$\omega_j = \omega_s - (\omega_s - \omega_e) \left(\frac{z_{\text{best}} - p_j}{p_{\text{max}} - p_{\text{min}}} - 1 \right)^2 \quad (11)$$

式中: z_{best} 为种群最优粒子; p_j 为第 j 个粒子的值; p_{max} 、 p_{min} 为粒子最大值、最小值; ω_j 为惯性权重; ω_s 、 ω_e 为惯性权重初始值、结束值。

2.2 求解流程

首先, 将电网的各项参数录入, 包括各节点负荷、线路阻抗等; 然后调整粒子群算法中的各项参数, 包括初始速度、种群规模、迭代次数等; 计算无储能时地区电网的潮流, 得到功率注入节点的功率及风电接入母线的电压波动, 并计算参考值; 然后利用改进粒子群算法计算考虑储能调节的电网潮流, 得到目标函数值, 计算出功率注入节点的功率波动, 以及新能源接入母线的电压波动; 根据电压波动幅度, 设置离散无功补偿时段, 在相应时段进行离散无功补偿, 根据前文计算方法, 算出无功补偿量。在储能出力的基础上, 加入离散无功补偿量, 进一步对电网电压进行调节, 计算出控制后的电压波动; 循环求解整个调度周期内的全部有功波动和电压波动, 直到调度周期结束。求解流程图如图 3。

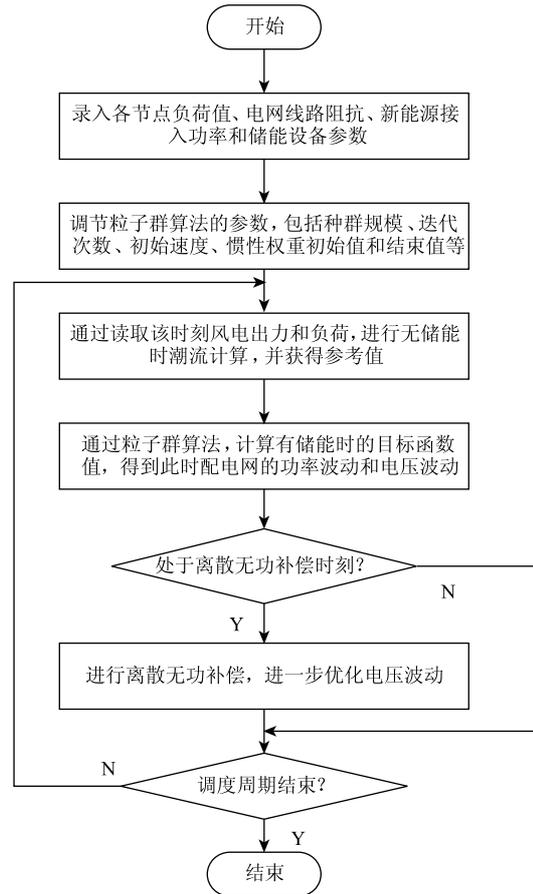


图 3 联合控制策略流程图

Fig. 3 Flow chart of joint control strategy

3 算例分析

本文设定一整天为一个完整的调度周期, 时间间隔为 15min, 因此将调度周期划分为 96 个时间间隔; 选择 IEEE14 节点电网进行算例分析, 电压等级为 23kV, 其结构如图 4 所示。1 节点为电网功率注入节点, 电压标幺值为 $1.05 \angle 0^\circ$; 选择 8 节点作为风电和储能设备接入点, 并且设置汇集站, 站内装设电容器和电抗器, 进行离散无功补偿, 其容量为 0.5Mvar, 其中风电各个时段出力如图 5 所示; 储能设备额定功率为 3MW, 容量为 18MWh, 初始 SOC 状态为 50%, 储能设备负责调解电网的功率波动; 设该电网功率基准值为 100MVA, 电网中各点负荷及线路参数标幺值如表 1、表 2 所示, 总负荷的有功功率为 28MW, 无功功率为 17.3Mvar, 同时考虑到电网一天当中负荷的波动情况, 实际负荷/额定负荷曲线如图 6 所示。

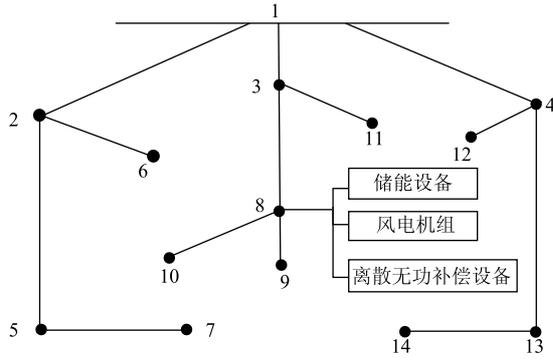


图 4 IEEE14 节点电网图

Fig. 4 Diagram of IEEE14 bus network

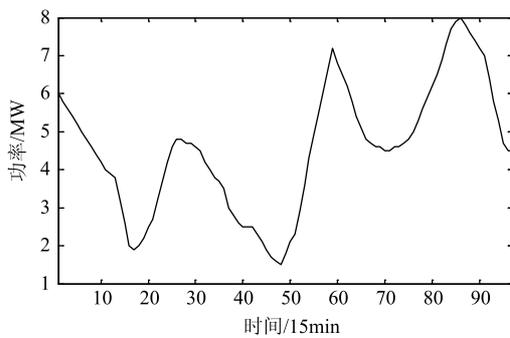


图 5 风电出力曲线

Fig. 5 The curve of wind power

表 1 各节点负荷

Tab. 1 Loads of notes

编号	负荷/MVA	编号	负荷/MVA
1	0	8	$5+3j$
2	$4+2.7j$	9	$4.5+2j$
3	$2+1.6j$	10	$0.6+0.1j$
4	$1+0.9j$	11	$1+0.9j$
5	$2+0.8j$	12	$1+0.7j$
6	$3+1.5j$	13	$1+0.9j$
7	$1.5+1.2j$	14	$2.1+1j$

表 2 线路参数

Tab. 2 Parameters of lines

首节点	末节点	线路阻抗(p. u.)	首节点	末节点	线路阻抗(p. u.)
1	2	$0.075+0.1j$	8	9	$0.08+0.11j$
1	3	$0.11+0.11j$	8	10	$0.11+0.11j$
1	4	$0.11+0.11j$	3	11	$0.11+0.11j$
2	5	$0.09+0.18j$	4	12	$0.09+0.12j$
2	6	$0.08+0.11j$	4	13	$0.08+0.11j$
5	7	$0.04+0.04j$	13	14	$0.04+0.04j$
3	8	$0.08+0.11j$			

3.1 储能系统不工作

首先，分析不考虑储能系统工作时，系统的功

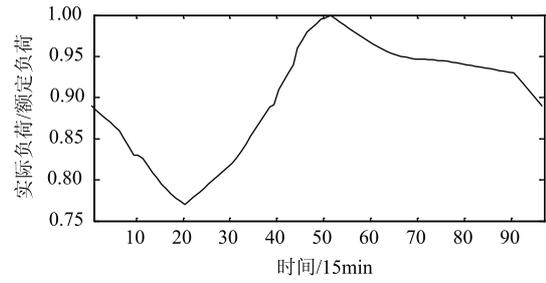


图 6 负荷曲线

Fig. 6 The curve of loads

率波动及风电接入点的电压波动情况。在整个调度周期内，考虑各时段风电出力及一天内负荷的波动情况，进行潮流计算，算出一个完整调度期间内的功率波动和电压波动情况，如图 7、图 8 所示。

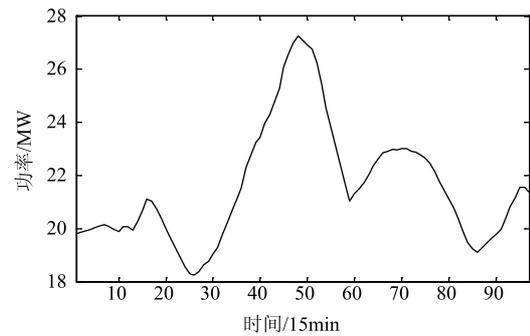


图 7 储能不工作时电网有功功率

Fig. 7 Active power of network without the energy storage

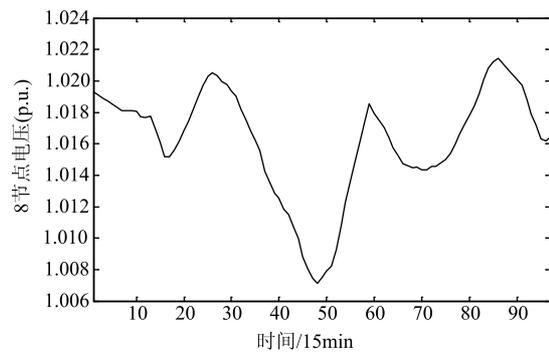


图 8 储能不工作时 8 节点电压

Fig. 8 Voltage of the bus 8 without the energy storage

通过图 7 可以看出，由于考虑了风电出力及负荷波动情况，1 节点的功率波动较大，特别是在 44-53 这个时间段内，由于用电需求较大，而风力发电有限，导致 1 节点的功率迅速增长；在 18-34 时间段内，由于负荷处于低谷状态，而风电出力较高，导致 1 节点功率下降。如果未来的地区电网中，新能源渗透率继续升高，用电需求变化更大，较

大的功率波动将会威胁电网的稳定运行。因此随着地区电网的发展,对于功率的调节是非常有必要的。

通过图8可以看出,8节点的电压波动在23-31,41-53,84-90这3个时间段内峰谷差较大。

3.2 储能系统工作

考虑储能设备工作时,应用改进粒子群算法对储能设备进行控制。设定粒子群算法的迭代次数为30,种群规模为50,最大、最小速度分别为0.3、-0.3;滤波系数为0.05;惯性权重初始值和结束值分别为0.9、0.4。考虑储能设备工作时的功率波动和电压波动曲线如图9、图10,其SOC如图11。

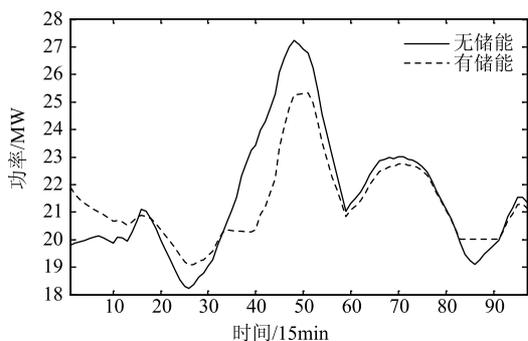


图9 储能工作时电网有功功率

Fig. 9 Active power of network with the energy storage

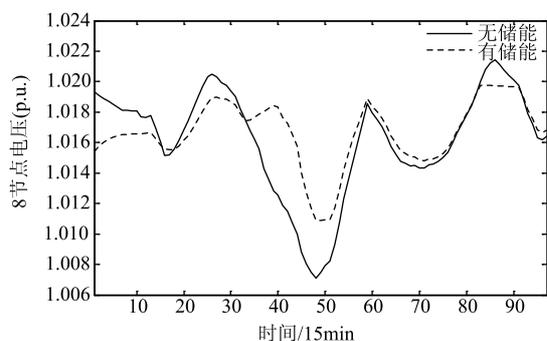


图10 储能工作时8节点电压

Fig. 10 Voltage of the bus 8 with the energy storage

由图可知,相比于储能系统不工作的情况,本节通过改进粒子群算法对储能设备进行控制,使电网的功率波动有了很大改善,有效降低了功率波动峰值。电压的波动情况也有改善,但在24-31,46-53,82-92这3个时段内仍存在较大峰谷差。

通过图11可以看出,在21-34时间段内,由于SOC反馈控制,使得SOC增长速率减缓,避免了储能系统充电过多。在76-84时间段内,由于SOC反馈控制,使得SOC下降速率缓慢,避免了

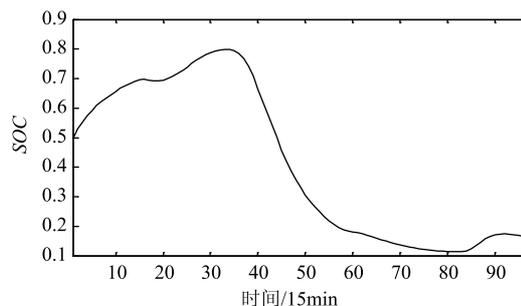


图11 储能系统SOC变化情况

Fig. 11 Changes of SOC

储能系统过度放电。储能系统的SOC在整个调度周期内,均保持在0.1~0.9之间,有效避免了储能系统的过度充放电。

3.3 联合控制策略

由于改进粒子群算法控制储能设备,对电压波动情况的改善较小,因此考虑1.2节提到的离散无功补偿策略。通过前面的计算,可以看出在24-31,46-53,82-92这3个时段内电压波动较大,因此在储能设备工作的基础上,选择在这3个时段进行离散无功补偿,补偿后的电压波动如图12所示。

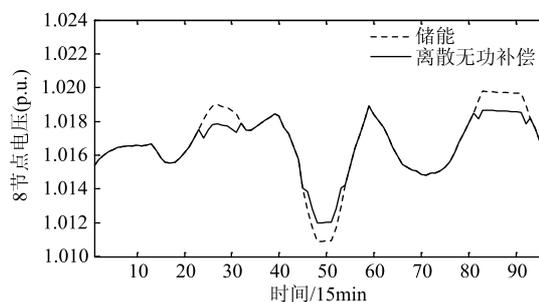


图12 联合控制策略8节点电压

Fig. 12 Voltage of the bus 8 using joint control strategy

通过上图可以看出,考虑离散无功补偿之后,电压波动情况比只考虑储能设备工作时,得到了进一步改善,起到了调节电压波动的作用。由于其余时段的电压波动不大,因此只选择这3个时段进行离散无功补偿。在上文提到的24-31,46-53,82-92这三个时间段对电压的峰谷值进行了调节,使得电压更加平稳。

为了更直观对比优化前后功率波动和电压波动的情况,可分别计算相应的标准差,结果如表3。

由于联合控制策略是建立在储能设备对有功功率波动调节的基础上,进行离散无功补偿,因此其标准差不发生变化。通过标准差分析可以看出,联

表 3 标准差比较

Tab. 3 Comparison of standard deviation

控制方式	功率标准差	电压标准差
无储能	2.242 2	0.003 5
含储能	1.406 8	0.002 0
联合控制	1.406 8	0.001 6

合控制策略的优化效果较好, 既减小了功率波动, 又通过离散无功补偿策略改善了电压波动, 且优化效果较为明显。本算例的离散无功补偿时间段是根据前文的分析得出的, 如果风电出力及负荷曲线发生变化, 可调整补偿时间段, 增强系统的可调度性。

4 结 论

本文提出了一种储能的联合控制策略, 用以调节含新能源的地区电网中, 由于新能源出力的不确定性而引起的功率波动和电压波动。主要结论如下:

① 以电网功率波动最小为优化目标, 建立数学模型。在完整的调度周期内, 同时考虑分布式电源出力波动和负荷波动, 使用粒子群算法求解目标函数, 通过控制储能设备的充放电功率, 达到调节电网功率波动的目的, 此优化算法求解过程简单易行。并且考虑储能设备不能过度充放电, 因此引入 SOC 反馈控制, 有利于保护储能设备。

② 对粒子群算法进行改进, 通过计算种群最优值与粒子的差值, 对惯性权重进行控制, 有效提高了粒子群算法的搜索能力和收敛性。同时引入离散无功补偿策略, 对电网电压进行调节。在新能源接入点接入离散无功补偿装置, 提前设定好补偿时段, 对该时段内电网电压进行调节, 使其电压波动较小。此种补偿方法的针对性较强且效果较好。

③ 利用 IEEE14 节点进行算例分析, 在 8 节点接入风电和储能设备, 同时在此处设置离散无功补偿设备。首先在储能不工作情况下, 通过潮流计算, 得到电网的功率波动和电压波动, 以此作为对比参考; 然后以电网有功功率波动最小为目标函数, 通过储能设备工作调节电网的有功功率, 使得有功波动减小, 但电压仍存在较大的峰谷差; 针对三个峰谷差较大的时段, 考虑离散无功补偿策略, 进一步调节新能源接入母线电压, 使得电压峰谷差减小。最后通过分析功率波动和电压波动的标准差, 可以看出结合了离散无功补偿的联合控制策略较为有效。

参 考 文 献

- [1] 艾欣, 董春发. 储能技术在新能源电力系统中的研究综述 [J]. 现代电力, 2015, 32(5): 1-9.
AI Xin, DONG Chunfa. Review on the application of energy storage technology in power system with renewable energy sources [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(5): 1-9.
- [2] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9.
- [3] 陈宇豪, 王磊, 杨宇, 等. 风储直流微网孤岛运行控制研究 [J]. 分布式能源, 2016, 1(1): 40-46.
CHEN Yuhao, WANG Lei, YANG Yu, et al. Study on autonomous operation and control of wind power and energy storage DC microgrid [J]. Distributed Energy, 2016, 1(1): 40-46.
- [4] 杨李星, 严晓杰, 周宇. 一种基于混合储能的低压直流配电网母线电压控制策略 [J]. 电工电气, 2017(1): 30-34, 42.
YANG Lixing, YAN Xiaojie, ZHOU Yu. A kind of busbar voltage control strategy of low-voltage direct current power distribution network based on hybrid energy storage [J]. Electrotechnics Electric, 2017(1): 30-34, 42.
- [5] 车勇, 彭超锋, 袁铁江, 等. 计及储能的风电平衡区域电网优化划分方法 [J]. 电网技术, 2017, 41(3): 775-781.
CHE Yong, PENG Chaofeng, YUAN Tiejia, et al. An optimized partitioning method balancing wind power in local power grid considering energy storage system [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 775-781.
- [6] MA T, CINTUGLU M H, MOHAMMED O A. Control of a hybrid AC/DC microgrid involving energy storage and pulsed loads [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 567-575.
- [7] HASSAN S Z, LI H, ÇAGRIYENER Şuayb, et al. Integration and simulation of wind with hydrogen/supercapacitor storage hybrid system [C] //2017 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Lahore, Pakistan, 2017: 1-6.
- [8] XIAO J, WANG P, SETYAWAN L. Hierarchical control of hybrid energy storage system in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4915-4924.
- [9] 赵晶晶, 徐传琳, 吕雪, 等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4324-4332, 4572.
ZHAO Jingjing, XU Chuanlin, LYU Xue, et al. Op-

- timization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4324 - 4332, 4572.
- [10] PULENDRAN S, TATE J E. Energy storage system control for prevention of transient under-frequency load shedding [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 927 - 936.
- [11] 熊超, 马瑞. 考虑降损和平抑峰谷的配电网储能电池 Pareto 优化模型 [J]. 电力建设, 2015, 36(8): 34 - 40.
XIONG Chao, MA Rui. A pareto optimal model for energy storage battery in distribution network considering network loss and peak-valley difference alleviation [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 34 - 40.
- [12] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容 [J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405 - 3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405 - 3411.
- [13] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125 - 135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125 - 135.
- [14] 陈明, 顾伟, 李鹏, 等. 主动配电网分区分布式无功优化控制方法 [J]. 现代电力, 2017, 34(6): 40 - 44.
CHEN Ming, GU Wei, LI Peng, et al. Distributed reactive power optimization control method for active distribution network based on subarea division [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(6): 40 - 44.
- [15] 王永全, 李振坤, 王永志. 主动配电网多级无功电压协调控制研究 [J]. 现代电力, 2018, 35(1): 1 - 7.
WANG Yongquan, LI Zhenkun, WANG Yongzhi. Research on multi-level reactive power and voltage control of active distribution networks [J]. Modern Electric Power, 2018, 35(1): 1 - 7.
- [16] 卢锦玲, 赵大千, 任惠, 等. 考虑储能和无功补偿的主动配电网分布式电源规划 [J]. 现代电力, 2017, 34(4): 59 - 64.
LU Jinling, ZHAO Daqian, REN Hui, et al. Distributed generation planning for active distribution network by considering energy storage and reactive power compensation [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 59 - 64.
- [17] 钟清, 张文峰, 周佳威, 等. 主动配电网分层分布控制策略及实现 [J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1511 - 1517.
ZHONG Qing, ZHANG Wenfeng, ZHOU Jiawei, et al. Hierarchical and distributed control strategy for active distribution network & its implementation [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1511 - 1517.
- [18] 曾博, 杨煦, 张建华. 考虑可再生能源跨区域消纳的主动配电网多目标优化调度 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 148 - 158.
ZENG Bo, YANG Xu, ZHANG Jianhua. Multi-objective optimization for active distribution network scheduling considering renewable energy harvesting across regions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 148 - 158.
- [19] 刘文颖, 郭鹏, 但扬清, 等. 含大规模风电接入电网的双时间尺度无功协调控制 [J]. 可再生能源, 2016, 34(12): 1811 - 1818.
LIU Wenyong, GUO Peng, DAN Yangqing, et al. Dual-scale scalar coordinated control of large scale wind power connected to power grid [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(12): 1811 - 1818.
- [20] 杜波, 刘文颖, 汪宁渤, 等. 基于灵敏度方法的大规模风电接入区域电压优化控制 [J]. 电力科学与工程, 2012, 28(8): 13 - 17.
DU Bo, LIU Wenyong, WANG Ningbo, et al. Voltage optimization control of large scale wind power access area based on sensitivity method [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(8): 13 - 17.
- [21] 乔俊飞, 王超, 魏静. 一种具有局部搜索的自适应粒子群算法 [J]. 信息与控制, 2015(4): 385 - 392.
QIAO Junfei, WANG Chao, WEI Jing. An adaptive particle swarm optimization algorithm with local search [J]. Information and Control, 2015(4): 385 - 392.
- [22] 吴立坤. 基于粒子群算法的风电场并网电力系统的无功优化 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

收稿日期: 2017-07-29

作者简介:

罗金山(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划设计, E-mail: luojinshan@chinasperi.sgcc.com.cn;

周泊宇(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与电网规划, E-mail: zhouboyu916@163.com;

张艳(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划设计, E-mail: zhangyan@chinasperi.sgcc.com.cn;

艾欣(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源电力系统及微网, E-mail: aixin@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 杨秋霞)