

DOI: 10.7500/AEPS20130804001

主动配电网优化调度策略研究

尤 毅^{1,2}, 刘 东¹, 钟 清², 余南华²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240;

2. 广东电网公司电力科学研究院, 广东省广州市 510080)

摘要: 主动配电网的优化调度策略是主动配电网实现经济及安全运行的重要保障,也是主动配电网对于分布式能源实施主动管理的核心技术。文中提出了一种考虑主动配电网特性以及分布式能源特性的优化调度模型,该模型以一个完整调度周期的运行成本最低为目标函数,以可控分布式能源以及联络开关作为控制手段,考虑不同时段电价以及联络开关调整对于运行成本的影响,并确保储能系统在整个调度周期的能量守恒以及容量约束。此外,针对所提出的主动配电网优化调度模型,提出了基于智能单粒子优化算法(ISPO)的求解方法,通过对粒子的位置表达形式以及粒子位置更新过程的改进,实现完整调度周期内复杂的主动配电网优化调度策略求解。最后,算例的计算结果验证了主动配电网优化调度模型及其求解算法的有效性。

关键词: 主动配电网; 分布式能源; 优化调度; 主动管理; 智能单粒子

0 引言

日益严重的环境污染以及传统化石燃料短缺等问题驱使分布式发电技术尤其是可再生能源发电技术迅速发展,未来的配电网势必要满足对分布式可再生能源发电的兼容包并^[1-2]。主动配电网作为智能配电网未来的发展趋势,是可以实现分布式电源在配电网中广泛接入及高度渗透的重要技术手段^[3-5]。根据 CIGRE C6.11 工作组的工作报告,主动配电网可定义为:可以综合控制分布式资源(例如分布式能源、柔性负载、储能等)的配电网,可以使用灵活的网络调节技术实现潮流的有效管理,分布式能源在其合理的监管环境和接入准则基础上承担对系统一定的支撑作用^[6]。主动配电网区别于传统配电网的一大显著特征表现在接入的分布式发电单元、储能单元以及微网单元等对于配电网运行人员来说都是可控的,分布式能源将参与网络的运行调度,并非以往简单的连接,这将赋予主动配电网调度运行更加丰富的内容,而不仅仅是传统配电网中联络开关的调整^[7]。主动配电网的优化调度策略^[8-9]是主动配电网对分布式电源实施主动管理并实现网络安全经济运行的核心技术和重要手段。但是间歇性可再生能源功率输出所固有的不确定性,储能系统受其自身能量限制引起的不同时间断面上的耦合

相关性以及配电网中联络开关位置的灵活可变性,使得主动配电网的优化调度策略十分复杂,基于传统最优潮流的优化调度模型及其计算方法对于主动配电网而言已不适用。

主动配电网的优化调度模型与传统电网的优化调度相比不论从控制变量、约束条件以及目标函数都发生了深刻变化。主动配电网优化调度的控制变量不仅包括可控分布式发电单元,例如燃料电池以及柴油发电机等,还有兼具充放电特性的储能系统^[10-11]以及配电网中的联络开关,而间歇性可再生能源单元例如风力以及光伏发电等,一般采用最大功率点跟踪(MPPT)控制模式^[12],是不可调度单元,不参与主动配电网的优化调度控制,这也是主动配电网对于绿色可再生能源最大化利用的核心价值体现。主动配电网优化调度策略的目标函数不再像传统最优潮流以某一时刻网损最小或发电成本最低为目标^[13],而是应该对整个调度周期的运行成本进行优化,这是因为传统电网的发电单元出力上下限是由其设备参数决定的,一直是恒定的,不随时间变化而变化,而主动配电网中接入的储能系统由于其自身的能量有限,不同时刻的出力上下限是实时变化的,当前时刻储能系统的可用能量完全取决于前面时刻的充放电策略,因此采用传统的针对单一时刻最优潮流目标求解的优化调度策略往往会由于违背了储能系统的能量约束而变得毫无意义。此外,主动配电网优化调度过程中的约束条件除了传统的功率平衡约束、潮流约束、节点电压约束、分布式发电功率上下限约束、辐射状拓扑约束之外,还要考虑

收稿日期: 2013-08-04; 修回日期: 2013-12-04。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050212)。

到储能系统的能量守恒及容量约束。

基于上述背景,本文重点研究了主动配电网的优化调度模型,该模型以一个完整调度周期的运行成本最低为目标函数,综合考虑了不同时段电价以及联络开关调整对于主动配电网运行成本的影响,以可控分布式能源以及联络开关作为控制手段并确保整个调度周期内储能系统的能量守恒及容量限制。针对所研究的主动配电网优化调度模型,提出了基于智能单粒子优化算法(intelligent single particle optimizer, ISPO)^[14]的求解方法,通过对粒子的位置表达形式以及粒子位置更新过程的改进,最终得出主动配电网完整调度周期的优化调度策略。

1 主动配电网优化调度模型

主动配电网优化调度的本质是在确保绿色可再生能源最大化利用的前提下,对主动配电网主动管理涉及的所有控制手段进行统筹协调,实现运行成本最低,其控制内容涵盖源、网、荷3个方面:包括可控分布式发电单元(如柴油发电机、燃料电池等)功率调度为代表的电源控制和以联络开关的位置变换为代表的网络控制,以及以储能电池充放电策略为代表的柔性负载控制。因此,主动配电网优化调度的控制向量可以表示为 $[P_{DG-1}, \dots, P_{DG-i}, \dots, P_{DG-n}, P_{ESS-1}, \dots, P_{ESS-j}, \dots, P_{ESS-m}, O]^T$ 。控制向量的前 n 个分量是可控分布式发电单元(燃气轮机、燃料电池等)的功率输出,中间 m 个分量是储能单元的充放电功率,最后1个分量表示的是联络开关的位置方案。

主动配电网优化调度的目标函数可表示如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^k \left(\sum_{g=1}^l C_g(t) P_g(t) \Delta T + \sum_{i=1}^n C_i(t) P_{DG-i}(t) \Delta T \right) \quad (1)$$

式中: k 为完整调度周期可以划分的单位阶段数,对于每个阶段可认为各个分布式发电单元出力、储能单元出力以及负荷大小不变; ΔT 为单位阶段的时长; l 为整个最优潮流计算涉及的配网供电区域互联的馈线数; $C_g(t)$ 和 $P_g(t)$ 分别为第 g 条馈线在 t 时刻的电价成本和第 g 条馈线出口有功功率; n 为分布式发电单元的个数,这里的分布式发电单元是指功率可调节的发电单元,例如燃料电池以及柴油发电机等; $C_i(t)$ 和 $P_{DG-i}(t)$ 则分别为第 i 个分布式发电单元在 t 时刻的发电成本和有功出力。

该目标函数从本质上能反映出优化调度分布式可再生能源以及储能充放电策略合理化带来的收

益,一般来说,分布式能源发电成本优于电网,在负荷一定的情况下,分布式发电利用率越高,电网输送电能就越少,目标函数的值就越小。此外,储能系统的优化调度可以实现在谷时充电、峰时放电带来的峰谷电价差收益,同样可以使目标函数值变小。

主动配电网优化调度的约束条件除了常规的节点电压约束和支路潮流约束之外,还包括如下约束。其中,式(2)表示的含义是在整个调度周期内馈线的出口功率与该时刻每个分布式电源出力、储能系统的充放电功率以及联络开关的位置有关,即要求时时满足含分布式能源的配网潮流等式约束;式(3)和式(4)是要求分布式电源出力以及储能系统的充放电功率不能超过其上下限,主要受限于分布式发电或储能系统的设备参数及其逆变器容量;式(5)要求联络开关的位置必须保证配电网的辐射状结构;式(6)是由于储能系统容量在一定范围以内才能保持比较高的效率^[15],所以必须确保每个储能系统的容量处于合理范围区间;式(7)确保整个调度周期过程中每个储能系统的能量守恒,即储能系统放电的能量等于充电的能量。

$$P_g(t) = F_P(P_{DG-i}(t), P_{ESS-j}(t), O(t)) \quad (2)$$

$$P_{DG-i}^{\min} \leq P_{DG-i}(t) \leq P_{DG-i}^{\max} \quad (3)$$

$$P_{ESS-j}^{\min} \leq P_{ESS-j}(t) \leq P_{ESS-j}^{\max} \quad (4)$$

$$V(O(t)) \in G \quad (5)$$

$$E_j^{\min} \leq E_j(t) \leq E_j^{\max} \quad (6)$$

$$E_j(0) = E_j(k \Delta T) \quad (7)$$

式中: $P_{ESS-j}(t)$ 为第 j 个储能单元在 t 时刻的充放电功率; $O(t)$ 为 t 时刻的联络开关位置方案; $P_{DG-i}^{\min}$ 和 $P_{DG-i}^{\max}$ 分别为第 i 个分布式发电单元的功率下限值和上限值; $P_{ESS-j}^{\min}$ 和 $P_{ESS-j}^{\max}$ 分别为第 j 个储能单元的功率下限值和上限值; $V(O(t))$ 为配电网联络开关的位置方案; G 为配电网的辐射状结构; $E_j(t)$ 为第 j 个储能单元在 t 时刻的剩余能量; $E_j^{\min}$ 和 $E_j^{\max}$ 分别为第 j 个储能单元剩余能量的最小允许值和最大允许值。

2 主动配电网优化调度求解策略

根据上节内容可以分析得出主动配电网的优化调度控制既包括诸如分布式发电单元及储能单元等连续型控制变量又包括联络开关等离散型控制变量,本质上是一个混合整数非线性约束规划问题。将内点法^[16]直接应用于主动配电网优化调度策略的求解难以获得好的效果,需采用适用性更广、对求解条件要求更加宽松的智能优化算法。

ISPO在传统粒子群优化(PSO)算法的基础上增加了各维度优化方向的分析能力,能得到更接近

于全局最优点的优化解,且只需要从单一粒子进化,求解过程简单,通过参数控制可以较好地平衡全局搜索和局部搜索,能够非常有效地用于各种优化问题尤其是非线性优化问题的求解^[17]。

2.1 ISPO 的粒子位置矢量表达

对于主动配电网优化调度策略的求解而言,粒子的位置矢量表达形式非常重要。由主动配电网的优化调度模型可知,应用于主动配电网优化调度求解的智能单粒子位置可以表达为一个 $g \times k$ 阶的矩阵,其中, $g = n + m + 1$ 。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,k} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,k} \\ x_{(n+1),1} & \cdots & x_{(n+1),k} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{(n+m),1} & \cdots & x_{(n+m),k} \\ x_{(n+m+1),1} & \cdots & x_{(n+m+1),k} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: n 为分布式发电单元的个数; m 为储能单元的个数; k 为完整调度周期包含的阶段数。

矩阵前 n 行向量中的任一行向量 $[x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,p}, \dots, x_{j,k}]$ 表示的是第 j 个分布式发电单元完整调度周期的控制策略。其中,第 p 个元素 $x_{j,p}$ 为第 j 个分布式发电单元在阶段 p 的有功出力,并且满足下式:

$$P_j^{\min} \leq x_{j,p} = P_j^p \leq P_j^{\max} \quad j \in [1, n] \quad (9)$$

式中: $P_j^{\min}$ 和 $P_j^{\max}$ 分别为第 j 个分布式发电单元的有功功率下限值和上限值,也是位置元素 $x_{j,p}$ 的范围。

矩阵第 $n+1$ 行至第 $n+m$ 行向量中的任一行向量 $[x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,p}, \dots, x_{j,k}]$ 表示的是第 j 个储能单元完整调度周期的充放电策略。其中,第 p 个元素 $x_{j,p}$ 为第 j 个储能单元在阶段 p 的剩余能量,并且满足下式:

$$E_j^{\min} \leq x_{j,p} = E_j^p \leq E_j^{\max} \quad j \in [n+1, n+m] \quad (10)$$

式中: $E_j^{\min}$ 和 $E_j^{\max}$ 分别表示第 j 个储能单元的能量下限值和上限值,也是位置元素 $x_{j,p}$ 的范围。

根据储能单元特性,第 j 个储能单元在阶段 p 的充放电功率近似如式(11)所示:

$$P_j^p = \begin{cases} \frac{E_j^p - E_j^{p+1}}{\Delta T} & p < k \\ \frac{E_j^k - E_j^1}{\Delta T} & p = k \end{cases} \quad (11)$$

当阶段 p 不为 k 时,其充放电功率为上一阶段的剩余能量减去下一阶段的剩余能量除以阶段的时长,而当 p 等于 k 时,其充放电功率等于结束阶段

的剩余能量减去开始阶段的剩余能量除以阶段的时长,这是为了确保一个完整调度周期结束后约束式(7)的成立,即完整调度周期过程中储能单元的放电能量等于其充电能量。当 $P_j^p > 0$ 时,表示处于放电状态;当 $P_j^p < 0$ 时,则表示处于充电状态。将储能单元的剩余能量作为粒子的储能位置变量,可以通过粒子位置的范围限制确保储能能量不越限,因而避免出现直接以充放电功率作为粒子位置变量时由于位置更新导致储能单元能量越限的问题,这也是通过 ISPO 实现求解主动配电网优化调度策略的关键步骤。

矩阵的最后 1 行向量 $[x_{n+m+1,1}, x_{n+m+1,2}, \dots, x_{n+m+1,p}, \dots, x_{n+m+1,k}]$ 表示的是整个调度周期的联络开关位置方案。其中,第 p 个元素 $x_{n+m+1,p}$ 为在阶段 p 的联络开关位置方案, $x_{n+m+1,p}$ 的取值以涉及的所有开关的开闭状态组合所对应的状态值表示,将各个开关进行按位编号,以二进制方式取值 0 或 1 表示。0 表示断开,1 表示闭合,其二进制组合对应的十进制数就是该联络开关方案的取值。

为了确保在进行粒子优化的过程中,可以使用统一的速度及位置控制参数,需要对粒子进行归一化处理,处理后新的粒子位置矢量 (i, j) 的元素值 $\bar{x}_{ij}$ 表达为

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\min}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}} \quad (12)$$

式中: x_{ij} 为原粒子位置矢量 (i, j) 的元素值; $x_{ij}^{\max}$ 和 $x_{ij}^{\min}$ 分别为原粒子位置矢量 (i, j) 的元素值的上限值和下限值。

2.2 ISPO 的位置更新

一般的粒子群算法在每次迭代时,粒子的位置更新过程基于全体种群,同时改变整个解矢量中各维的数值,虽然通过适应值的求解可以判断解的整体质量,但不能判断部分维向是否向最优方向移动,难以兼顾所有维的优化方向。为解决上述问题,可以采用 ISPO 对原有的高维粒子进行子矢量划分,再将每个子矢量逐一顺序循环进行更新进化,从而可以确保每个子矢量都向最优方向进化,以获取质量更好的解。

ISPO 更加出色的寻优能力依赖于对子矢量的合理划分,将目标函数对于全矢量不同维度的优化方向加以区别,分别优化。根据主动配电网优化调度模型的特征,主动配电网优化调度 ISPO 的子矢量将从时间和空间 2 个维度上进行划分,其步骤如下。

步骤 1: 将智能单粒子位置矩阵按时间分阶段进行划分,对于一个 $g \times k$ 阶的矩阵划分为 k 个子

向量,每个子向量对应一个阶段的所有分布式单元及联络开关的控制策略;

步骤 2:在步骤 1 的基础上,将各个子向量按空间位置进行划分,把处于相同分段开关间隔内的所有分布式单元划分为一个子向量,联络开关位置方案单独划分为一个子向量。

根据上述步骤,可知同一阶段处于相同分段开关间隔内的分布式发电单元和储能单元组成一个子向量,同一阶段的联络开关位置方案为一个子向量。若第一个分布式发电单元和第一个储能单元处于同一段开关间隔内,对于同一阶段 j 的列向量则将其划分为同一个子向量 z_{j1} ,以此类推,直至联络开关位置元素单独成为子向量,则对于式(8)的粒子位置矩阵而言可依次划分出 $r \times p$ 个子向量。

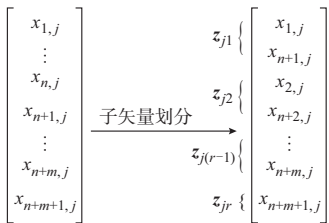


图 1 单粒子子向量划分示意
Fig.1 Schematic diagram of sub-vector partition for particle vector

ISPO 的位置矢量更新过程是基于子向量,按先后顺序进行循环更新,在更新第 i 个子向量的过程中,将按以下的速度和位置更新公式迭代执行 N_i 次子迭代。

$$v_i^{k+1} = \frac{r}{k+1} b L_i^k \quad (13)$$

$$z_i^{k+1} = \begin{cases} z_i^k + v_i^{k+1} & f(x_1^{k+1}) > f(x_2^{k+1}) \\ z_i^k & f(x_1^{k+1}) \leq f(x_2^{k+1}) \end{cases} \quad (14)$$

$$L_i^{k+1} = \begin{cases} v_i^{k+1} & f(x_1^{k+1}) > f(x_2^{k+1}) \\ \frac{L_i^k}{s} & f(x_1^{k+1}) \leq f(x_2^{k+1}) \end{cases} \quad (15)$$

式中:前一项值代表的是多样性部分, r 是取值区间为 $[-0.5, 0.5]$ 的随机矢量;后一项是学习性部分, b 为加速度因子; s 为收缩因子,有助于搜索迭代过程中动态调整速度,搜索到更优解。其中, $x_1^{k+1} = [z_1, z_2, \dots, z_i^k, \dots, z_{r \times p}]$; $x_2^{k+1} = [z_1, z_2, \dots, z_i^k + v_i^{k+1}, \dots, z_{r \times p}]$; $k = 0, 1, \dots, N_{i-1}$ 。ISPO 的位置进化过程如图 2 所示。

3 算例分析

本文基于国家能源局智能电网上海研发中心智能配电网实验室的主动配电网算例,来验证所提主动配电网优化调度模型及其解法的有效性。

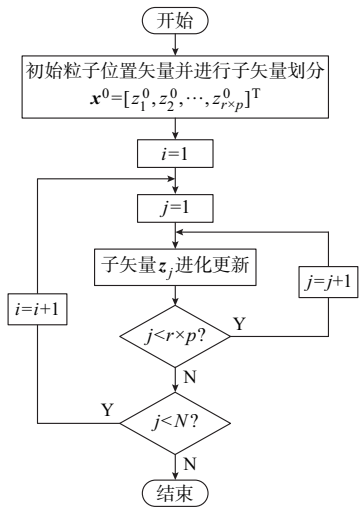


图 2 智能单粒子优化进化流程
Fig.2 Flow chart of ISPO evolution

如图 3 所示,本文用于主动配电网优化调度的算例是一个包含双电源点,3 馈线互联的 44 节点主动配电网测试系统。该系统包含的分布式发电单元及储能单元总个数为 15,其类型及配置参数如表 1 所示。

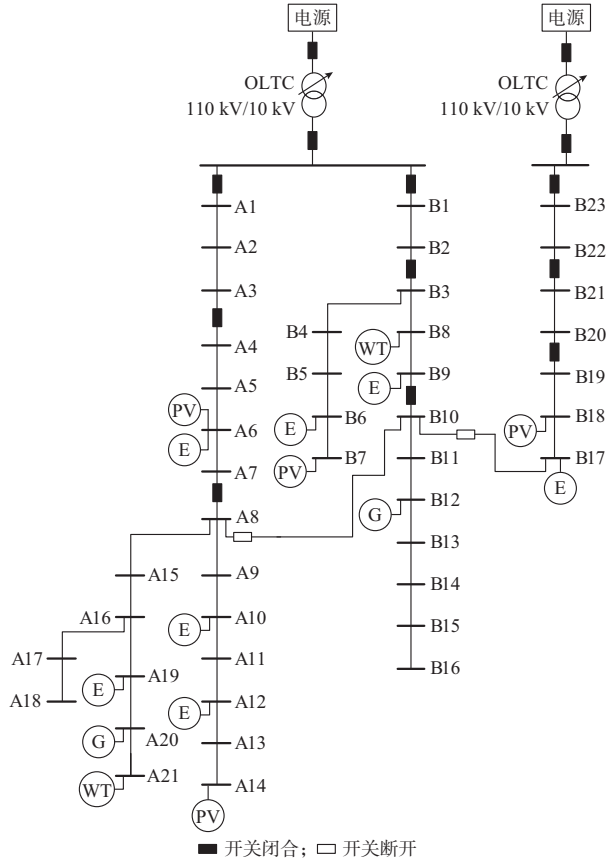


图 3 主动配电网最优潮流示范算例
Fig.3 Case study of ADN OPF

表 1 分布式电源及储能单元配置
Table 1 DG & DESS parameters configuration

序号	连接节点	类型	参数	调度模式
1	A6	光伏	500 kW	不可调度
2	A6	电池储能	250 kW · h	可调度
3	A10	电池储能	250 kW · h	可调度
4	A12	电池储能	250 kW · h	可调度
5	A14	光伏	500 kW	不可调度
6	A19	电池储能	250 kW · h	可调度
7	A20	燃气轮机	300 kW	可调度
8	A21	风力	500 kW	不可调度
9	B6	电池储能	500 kW · h	可调度
10	B7	光伏	500 kW	不可调度
11	B8	风力	500 kW	不可调度
12	B9	电池储能	500 kW · h	可调度
13	B12	燃气轮机	300 kW	可调度
14	B17	电池储能	250 kW · h	可调度
15	B18	光伏	300 kW	不可调度

注：表中光伏、风力、燃气轮机的参数表示输出峰值功率。

该算例以一天 24 h 为一个完整调度周期,调度间隔为 1 h,峰时电价为 610 元/(MW · h),谷时电价为 310 元/(MW · h),燃气轮机发电成本为 500 元/(MW · h)。该系统各负荷节点全天的负荷参数以及各间隙性能源(例如风力、光伏等)全天的有功出力详情参见附录 A 表 A1。

为了获得较好的算法稳定性以及较快的收敛速度,参考文献[18],ISPO 的参数可设置为: $N_i=5$, $b=2$, $s=4$, $N_{\max}=50$ 。由于对粒子进行了归一化处理,因此粒子各元素的位置范围可设定为 $[0,1]$,速度范围可设定为 $[-1,1]$ 。

经程序计算,测试系统各可控单元全天的最优有功出力以及联络开关位置的最优策略见附录 A 表 A1。表 A1 的数据表明主动配电网的优化调度不仅给出了每个间隔可调度分布式发电以及储能单元的调度策略,与此同时也求解出每个间隔内的联络开关最优位置,实现了源、网的统筹优化。此时全天运行成本为 38 097.27 元,较之未采用优化调度时的运行成本 39 326.12 元,直接经济效益提升了 3.15%。算例中总的负荷曲线以及总的分布式发电出力(包括燃气轮机和储能单元)曲线如图 4 所示。

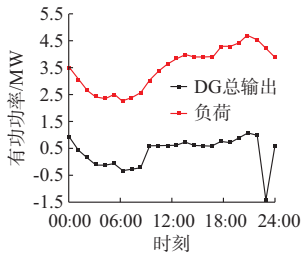


图 4 总负荷及总的分布式发电出力曲线
Fig.4 Active power curve of load & DGs

通过表 A1 的结果还可以发现:经过优化调度的计算,各个储能单元的充放电策略都得到了合理的分配,在负荷最低谷期间(03:00—08:00),各个储能单元基本处于充电状态,在负荷平稳期间(09:00—16:00),各储能单元充放电功率为 0,这是为了保持能量以应对负荷最高峰期间(17:00—21:00)的放电需要。而燃气轮机的出力特性主要是由峰谷电价决定的,在峰时期间电价成本较高,基本都处于满发的状态,而在谷时期电价成本较低,其出力为 0。

分布式发电的总出力(包括燃气轮机和储能单元)特性与馈线的负荷特性基本保持一致,当负荷较大时分布式发电的总出力越大,而负荷较小时则其总出力较小,如图 4 所示。由图 4 还能发现分布式出力的拐点出现在 22:00,这是因为 21:00 为负荷最高峰点,各储能单元的能量基本已经到极限状态,为了后面阶段的放电输出,所有的储能单元必须充电。

附录 A 图 A1 显示出全天各个储能单元的荷电状态(SOC),始终处于 20%到 90%的有效区间内,满足式(7)的 SOC 状态约束,进一步可表明优化调度策略的合理性及可用性。从图 A1 中各储能单元的 SOC 状态曲线还能发现各个储能单元的 SOC 变化趋势不同,各个储能单元的全天充放电策略差异较大,例如 A19 储能单元采用的快充快放的策略,而 B17 储能单元则采用比较平稳的充放电策略,这是由 ISPO 的优化特性决定的,因为每个储能单元处于的子矢量区间不同,因此其维度的优化方向也不同,从而得到不同特性的充放电策略。

此外,为了比对 ISPO 与一般 PSO 的优越性,本文分别对基于 ISPO 和一般 PSO 的收敛特性进行了比较,为了比较同等参数特性下的优化特性,一般 PSO 的最大迭代次数也设置为 50,粒子数目为迭代次数的一半左右,粒子数目 m 可设置为 20,学习因子 $c1=c2=2$,惯性参数 $\omega_{\max}=1$, $\omega_{\min}=0.2$ 。比较结果最终如图 5 所示。

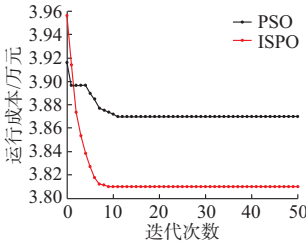


图 5 ISPO 与 PSO 收敛特性比较
Fig.5 Comparison of convergence properties between ISPO and PSO

图5的结果表明, ISPO的收敛速度与PSO基本一致, 但是其寻优能力明显优于PSO, 可以找到更接近全局最优解, 证明了ISPO的优越性。

4 结语

本文针对主动配电网的技术特征, 重点研究了主动配电网的优化调度模型及其求解方法, 实现了主动配电网在充分利用绿色可再生能源的基础上优化控制各个可控分布式发电单元、储能单元以及联络开关以达到经济运行的目的。基于ISPO的主动配电网优化调度策略求解算法简化了主动配电网优化调度模型中连续型控制变量和离散型控制变量混合控制带来的复杂度, 并解决了储能系统能量引起的不同时间断面的相关度等问题, 最终通过算例的结果分析, 验证了所提主动配电网优化调度模型及其求解策略的正确性和有效性。但本文所研究的主动配电网优化调度模型的运行成本目标没有考虑储能单元充放电切换对于储能装置的损耗以及联络开关切换对于开关装置的折损费用等, 有待进一步研究储能单元充放电过程中自身的损耗特性, 以得到更加精确的目标函数。另外, 所提的基于ISPO的主动配电网优化调度求解策略要求调度间隔不能过小, 以避免引起维数过大的粒子矩阵, 使得求解时间较长, 后续可考虑使用并行计算方法以快速求解间隔周期短精度要求高的主动配电网优化调度策略。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [2] 王成山, 李鹏. 2011年国际供电会议系列报道: 分布式能源发展与用户侧电能的高效利用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 1-5.
WANG Chengshan, LI Peng. A Review of CIRED 2011 on development of distributed energy resources and energy efficiency improvement on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 1-5.
- [3] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [4] HIDALGO R, ABBEY C, JOÓS G. A review of active distribution networks enabling technologies[C]// Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 9p.
- [5] SAMUELSSON O, REPO S, JESSLER R, et al. Active distribution network-demonstration project ADINE [C]// Proceedings of the 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 11-13, 2010, Gothenburg, Sweden: 8p.
- [6] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks-update of CIGRE C6.11 working group activities[C]// Proceedings of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, June 8-11, 2009, Prague, Czech: 4p.
- [7] 陈星莺, 陈楷, 刘健, 等. 配电网智能调度模式及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 22-26.
CHEN Xingying, CHEN Kai, LIU Jian, et al. A distribution network intelligent dispatching mode and its key techniques[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 22-26.
- [8] PILO F, PISANO G, SOMA G.G. Advanced DMS to manage active distribution networks[C]// Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania: 8p.
- [9] MICHAEL J D, EUAN M D, IVANA K, et al. Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 790-799.
- [10] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 基于大规模储能系统的智能电网兼容性研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 15-19.
LIAO Huaqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. A study on compatibility of smart grid based on large-scale energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 15-19.
- [11] CELLI G, MOCCI S, PILO F, et al. Optimal integration of energy storage in distribution networks[C]// Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference, 2009, Bucharest, Romania.
- [12] 崔岩, 蔡炳煌, 李大勇, 等. 太阳能光伏系统 MPPT 控制算法的对比研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6): 535-539.
CUI Yan, CAI Binghuang, LI Dayong, et al. Comparative studies on the MPPT control algorithms of solar energy photovoltaic system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(6): 535-539.
- [13] 杨伟, 腾百岸, 孙磊. 电力市场中最优潮流模型及算法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 126-130.
YANG Wei, TENG Baian, SUN Lei. Optimal power flow model and its algorithm in environment of electricity market [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 126-130.
- [14] JI Z, LIAO H L, WANG Y W, et al. A novel intelligent particle optimizer for global optimization of multimodal functions[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007, Singapore.
- [15] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 9-16.
LIAO Huaqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy resources and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [16] 江全元, 黄志光. 基于功率-电流混合潮流约束的内点法最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 32-37.
JIANG Quanyuan, HUANG Zhiguang. Power-current hybrid power flow model based optimal power flow by interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 32-37.
- [17] 刘波. 粒子群优化算法及其工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社

社,2010.

[18] 纪震,周家锐,廖惠连,等.智能单粒子优化算法[J].计算机学报,2010,33(3):556-561.

Ji Zhen, ZHOU Jiarui, LIAO Huilian, et al. A novel intelligent single particle optimizer[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(3): 556-561.

尤 毅(1983—),男,博士研究生,主要研究方向:智能配电网. E-mail: youyi1983@163.com

刘 东(1968—),男,通信作者,博士,研究员,博士生导师,教育部新世纪优秀人才,主要研究方向:智能电网、电网的信息物理融合系统、调度自动化、配电自动化. E-mail: liudong@ieee.org

钟 清(1965—),女,高级工程师,主要研究方向:智能电网、电网规划,新能源技术. E-mail: zhongqing@gddky.csg.cn

(编辑 杨松迎)

Research on Optimal Schedule Strategy for Active Distribution Network

YOU Yi^{1,2}, LIU Dong¹, ZHONG Qing², YU Nanhua²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The optimal control strategy of the active distribution network (ADN) is the core technology to active management of distributed energy resources (DERs) and guarantee of economical and safe operation. This paper highlights an optimal schedule model for ADN on the basis of ADN and DERs features, whose purpose is minimum operation cost of a complete dispatching cycle by means of controllable DERs and tie-open switches, by considering the influence of electricity price variation at different times and the adjustment of tie-open switches position while ensuring energy conservation and capacity constraint of energy storage systems. In addition, an algorithm based on intelligent single particle optimizer (ISPO) is proposed to solve the optimal schedule strategy of ADN, which refreshes the vector position presentation and the position update process of the intelligent single particle. Finally, the case study results demonstrate the validity of the proposed optimal schedule model and its solution algorithm for ADN.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050212).

Key words: active distribution network (ADN); distributed energy resources (DERs); optimal schedule; active management; intelligent single particle optimizer (ISPO)