

交直流混合微电网一致性协调优化管理系统

何红玉¹, 韩蓓¹, 徐晨博², 张利军², 李国杰¹, 汪可友¹

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

摘要:考虑到分布式电源的高比例接入, 交直流混合微电网的能量管理是分布式电源协调工作的必要手段。针对集中优化的鲁棒性和灵活性不足的缺点, 根据交流子系统与直流子系统混联的特点, 提出基于一致性算法的协调优化管理系统。该系统以可控单元的成本最低为优化目标, 设置微增率为一致性变量, 基于“一致性+调整项”算法分配可控单元的功率。下垂控制基于本地信息调整参数, 维持系统的稳定性。典型交直流微电网算例仿真结果表明, 所提交直流混合微电网一致性优化管理系统能经济分配功率, 快速抑制电压与频率波动, 具有良好的暂态与稳态性能。

关键词:交直流混合微电网; 优化管理; 一致性算法; 下垂控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.020

0 引言

随着传统化石能源的日益枯竭和环境气候问题的日趋严重, 如何大规模高效、安全地引入分布式可再生能源早已成为研究热点。微电网^[1]作为一个由负荷、分布式电源和储能装置组成的自治自理自控系统, 根据与大电网的关系, 有并网与孤岛 2 种运行模式, 且分别具有其独特的能量管理方式^[2]。

交直流混合微电网兼备交流微电网与直流微电网的优势, 同时通过减少换流设备来降低换流损耗、提高经济效益, 因此是微电网的未来发展趋势^[3]。而能量管理系统(power manage system)是交直流混合微电网潮流管理的必要手段, 其管理方式主要有基于规则管理^[4]和最优化管理。最优化管理考虑了系统运行的经济效益, 因而在国内外引起广泛的关注^[3]。然而分布式电源的高渗透率与交直流混合微电网的可拓展性使得传统的集中式优化协调管理缺乏灵活性与可拓展性, 但分层优化策略^[5]在交直流混合微电网能量管理系统中有广阔的应用前景。

传统的分层优化策略通过层次之间的信息双向传递实现其管理的整体性。文献[6]提出的分层控制中, 底层分布式电源与上层中央 Agent 的协调交互实现系统的管理, 但是其仍是“点”对“多点”的通信。文献[7]所提出的三层微电网控制架构, 通过多种控制器的设置管理微电网的运行, 但是其内部

仍存在集中控制。在分层优化管理中引入一致性算法^[8], 能打破局部集中控制的思想。文献[9]设置发电机组的增量成本和柔性负荷的增量效益作为一致性变量, 实现经济调度。文献[10]将一致性算法实现经济优化的概念应用到孤立直流微电网中, 但未考虑交直流混合微电网的情况。文献[11-13]提出基于分布式算法的直流微电网自适应下垂控制, 实现了均流与稳定电压的目的, 但是未考虑系统的经济效益。文献[14]提出基于边际成本的改进下垂控制, 按各分布式电源边际成本一致分配功率。但是上述控制策略仅应用于交流微电网中, 本文将一致性优化管理应用到交直流混合微电网中, 同时考虑交流子微电网与直流子微电网联络线的特性, 使系统在经济最优的同时保持稳定。该管理策略的具体特点可阐述为:

a. 相比于传统集中式优化管理方式, 系统既能适应交直流混合微电网中分布式电源自主控制的特点, 又能实现系统整体运行的经济最优, 使能量管理系统具有经济性特点;

b. 一致性算法“点”对“点”的分布式通信网络比集中通信网络具有更好的延展性与灵活性, 满足分布式电源“即插即用”的特点, 同时分布式算法具有更好的鲁棒性提高了系统的抗扰动能力;

c. 一致性算法中“二次协调”过程与联络线监测点的设置, 使得系统兼备安全性的特点;

d. 在能量管理的执行速度上, 上层经济优化与下层稳定控制的协调工作使得系统在优化分配功率时, 能快速抑制电压与频率波动, 具有良好的暂态与稳态性能。

1 交直流混合微电网的优化模型

1.1 交直流混合微电网的典型结构

考虑新加坡南洋理工大学 Poh Chiang Loh 教

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407116); 国家高新技术研究发展计划(863 计划)项目(2015AA050102); 国网浙江省电力公司科技项目(5211JY16000X)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407116), the National High-Tech R&D Program of China(863 Program)(2015AA050102) and the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company(5211JY16000X)

授^[15]所提出的交直流混合微电网的概念以及低压交直流混合微电网在我国的应用前景,本文设计如图 1 所示的交直流混合微电网结构。该交直流混合微电网是通过双向变流器连接的交流子微电网与直流子微电网两部分所组成的典型结构。其中,交流子微电网通过公共耦合点 PCC (Point of Common Coupling) 与外部大电网相连通,实现交直流混合微电网的并网运行模式。根据我国工业和家用交流电为 220 V/380 V 与国外 DC 380 V 标准,设计交流母线电压为 380 V,直流母线电压为 380 V 和 48 V。其中,高电压(380 V)用来驱动主要家用设备,低电压(48 V)用来驱动小型桌面设备和计算机。交直流混合微电网既包括光伏电池 PV (PhotoVoltaic)、燃料电池 FC (Fuel Cell)、风机 WT (Wind Turbine)、微型燃机 MT (Micro Turbine) 和储能 ES (Energy Storage) 等分布式电源以及交流负荷、直流负荷,又包括各种电力电子设备。

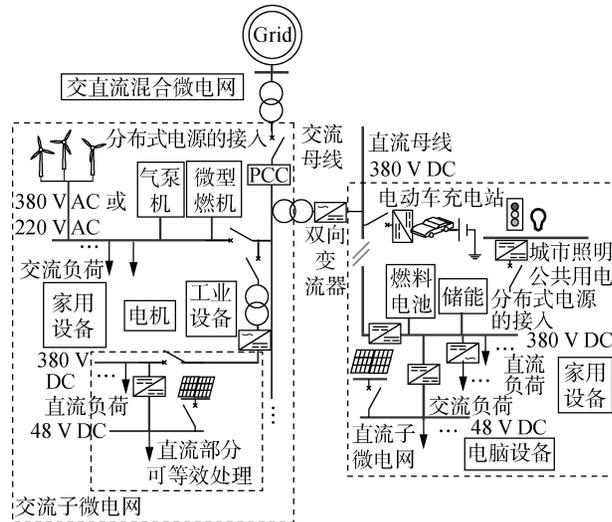


图 1 交直流混合微电网结构
Fig.1 Structure of AC/DC hybrid microgrid

1.2 目标函数

本文交直流混合微电网的经济运行是在分布式电源装备成本固定和忽略网损的情况下,以同步电机与储能装置等可控单元的运行成本^[16]最小为目标。其中储能装置分为充电与放电 2 种状态,目标函数表示为:

$$\min \sum_{i \in N} C_i(P_i) \quad (1)$$

其中, N 为同步机以及储能装置等可控单元的集合; $C_i(P_i)$ 为可控单元 i 的成本函数,如式(2)所示。

$$C_i(P_i) = \frac{1}{2} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

其中, P_i 为可控单元 i 的有功出力,其中储能装置放电时为正,充电时为负; a_i 、 b_i 、 c_i 为其成本系数。

边际成本函数为:

$$dC_i(P_i)/dP_i = a_i P_i + b_i = \lambda_i \quad (3)$$

图 2 为可控单元同步电机与储能装置的成本函数和边际成本函数示意图,图中, $\bar{P}_{G,i}$ 和 $\underline{P}_{G,i}$ 分别为同步电机的功率上、下限, $\bar{P}_{S,i}$ 和 $\underline{P}_{S,i}$ 分别为储能装置的功率上、下限。

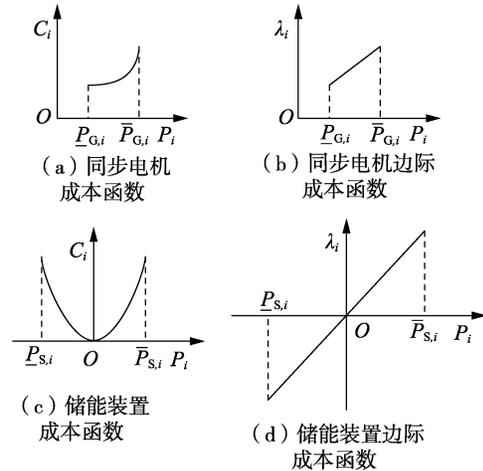


图 2 同步电机、储能装置成本函数和边际成本函数曲线

Fig.2 Cost functions and marginal cost functions for synchronous motor and storage system

1.3 约束条件

a. 有功平衡约束为:

$$\sum_{i \in N} P_i + P_{pv} + P_{wind} + P_{Grid} = \sum_{i \in M} P_{Di} \quad (4)$$

其中, P_{pv} 为光伏单元的有功出力; P_{wind} 为风机单元的有功出力; P_{Grid} 为交直流混合微电网从大电网购入的电量; P_{Di} 为单元 i 的本地有功需求; M 为系统内全部负荷的集合。

b. 同步电机运行约束为:

$$\mu_i P_i^{\min}(k) \leq \mu_i P_i(k) \leq \mu_i P_i^{\max}(k) \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_i^{\min}(k) = \max(\underline{P}_{G,i}, P_i(k-1) - \Delta P_{d,i}) \\ P_i^{\max}(k) = \min(\bar{P}_{G,i}, P_i(k-1) + \Delta P_{u,i}) \end{cases} \quad (6)$$

其中, μ_i 为同步电机 i 的工作状态,取值为 1 表示工作,取值为 0 表示停运; $P_i^{\min}(k)$ 、 $P_i^{\max}(k)$ 分别为同步电机 i 在 k 时刻有功可调下限与上限; $\Delta P_{u,i}$ 、 $\Delta P_{d,i}$ 分别为同步电机 i 在 $[k-1, k]$ 时间段内可增、减的功率最大值。

c. 储能装置运行约束为:

$$\begin{cases} E_{S,i}^{\min}(k) \leq E_{S,i}(k) \leq E_{S,i}^{\max}(k) \\ P_{S,i}^{\min}(k) \leq P_{S,i}(k) \leq P_{S,i}^{\max}(k) \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{S,i}(k) = \begin{cases} E_{S,i}(k-1) + P_{S,i}(k) \eta_{S1} \Delta T & P_{S,i}(k) < 0 \\ E_{S,i}(k-1) + \frac{P_{S,i}(k)}{\eta_{S2}} \Delta T & P_{S,i}(k) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_{S,i}(k)$ 为储能单元 i 在 k 时刻的输出功率,以输出功率为正方向,其受功率容量和电量容量的约束; $E_{S,i}(k)$ 为储能单元 i 在 k 时刻的电量,受到蓄电

池容量连续性约束,如式(8)所示; $E_{S,i}^{\min}(k)$ 、 $E_{S,i}^{\max}(k)$ 分别为蓄电池电量的下限和上限; ΔT 为从 $k-1$ 到 k 时刻的时间步长; η_{s1} 为充电效率; η_{s2} 为放电效率; $P_{S,i}^{\min}(k)$ 、 $P_{S,i}^{\max}(k)$ 分别为储能单元 i 在 k 时刻有功可调下限与上限,如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{S,i}^{\min}(k) = \max(\underline{P}_{S,i}, P_{S,i}(k-1) - \Delta P_{Sd,i}, P_{S,i}^{\text{ch}}(k)) \\ P_{S,i}^{\max}(k) = \min(\overline{P}_{S,i}, P_{S,i}(k-1) + \Delta P_{Su,i}, P_{S,i}^{\text{dis}}(k)) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\Delta P_{Su,i}$ 、 $\Delta P_{Sd,i}$ 分别为储能单元 i 在 $[k-1, k]$ 时间段内可增、减的功率最大值; $P_{S,i}^{\text{ch}}(k)$ 、 $P_{S,i}^{\text{dis}}(k)$ 分别为储能单元 i 在 $[k-1, k]$ 时间段内充电至上限、放电至下限所需的功率。

d. 联络线约束。

并网联络线容量约束为:

$$0 \leq P_{\text{Grid}}(k) \leq P_{\text{Grid}}^{\max}$$

其中, $P_{\text{Grid}}(k)$ 为 k 时刻从大电网的购电量; P_{Grid}^{\max} 为并网联络线容量约束下的最大购电功率。

交流子微电网与直流子微电网换流联络线功率约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{AC_DC}}(k) \leq P_{\text{AC_DC}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{DC_AC}}(k) \leq P_{\text{DC_AC}}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P_{\text{AC_DC}}(k)$ 、 $P_{\text{DC_AC}}(k)$ 分别为 k 时刻交流子微电网向直流子微电网传递的功率和直流子微电网向交流子微电网传递的功率; $P_{\text{AC_DC}}^{\max}$ 、 $P_{\text{DC_AC}}^{\max}$ 为传递功率的最大值。

本文假设所设计的交直流混合微电网是一个自消纳的微电网,风机和光伏的出力冗余可以通过储能充电与协调同步电机来消纳,因而只考虑交直流混合微电网向大电网购电的情况,不考虑交直流混合微电网向大电网售电的情况。按照我国风电与光伏发电最大消纳的原则,本文中风机和光伏都采用最大功率点跟踪(MPPT)控制,设计为不可控单元,因而在交直流混合微电网能量管理的优化模型中不考虑风机和光伏的运行成本,仅考虑可控单元(微型同步机和储能)的运行成本。

2 交直流混合微电网一致性协调策略

本文针对交直流混合微电网的能量管理问题,提出了基于一致性理论的协调优化管理策略,该策略包括上层优化与下层控制。上层优化中,各单元之间通过通信网络交互信息,通过一致性算法协调可控单元的出力,实现能量的优化管理。在并网运行模式下,当可控单元出力达到上限还无法满足微电网能量需求时,微电网从大电网购电以实现功率需求;在孤网运行模式下,当可控单元出力无法满足交直流微电网系统内功率平衡时,协调负荷实现系统的功率平衡。下层控制中,可控单元根据本地的

功率信息调节控制曲线,使运行点稳定在频率和电压恒定,实现交直流混合微电网的稳定运行。其一致性协调优化管理流程图如图3所示。

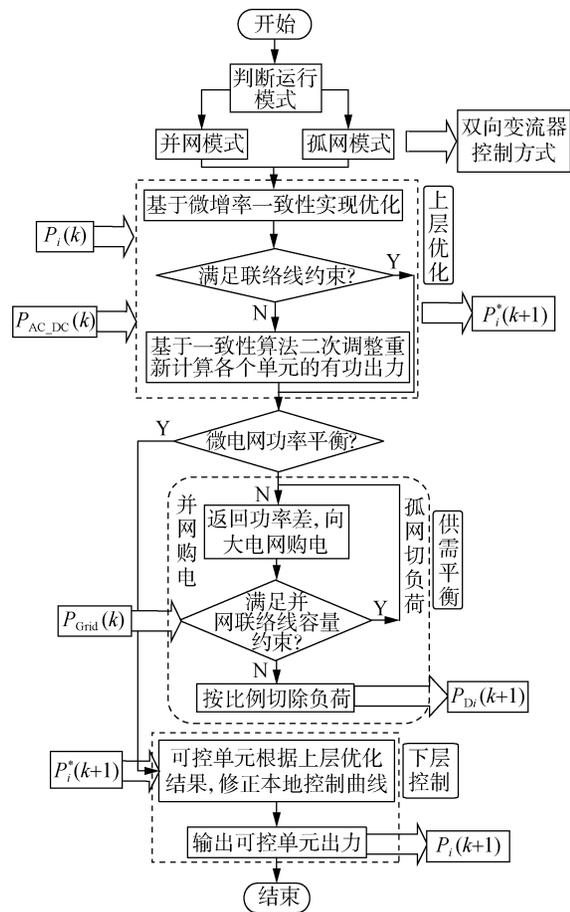


图3 交直流混合微电网一致性协调优化管理流程图

Fig.3 Flowchart of consensus coordinated optimal management for AC/DC hybrid microgrid

2.1 基于一致性算法的优化能量管理

2.1.1 一阶离散一致性算法

一致性算法在群体控制、队形控制、复杂动态网络、协调控制、聚合控制、拥塞控制和功率分配等^[8]多方面有较广泛的应用,本文选择较为简单的一阶离散一致性算法^[16]作为寻找交直流混合微电网最优经济运行点的方法,其具有收敛速度快、收敛条件简单的特点。离散系统下的迭代格式为:

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j[k] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

写成矩阵形式即为:

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{D}\mathbf{X}^k \quad (12)$$

其中, k 为时间状态; n 为离散系统中智能体单元的数目; \mathbf{X} 为系统状态变量 x_i 构成的向量; $\mathbf{D} = (d_{ij})$ 为系统状态转移矩阵。当其满足条件^[16]矩阵是非负行随机阵且矩阵的特征值均不大于1时,系统的各个状态变量 x_i 一致收敛于某一固定值 x_i^* :

$$x_i^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j[0] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

其中, $x_j[0]$ 为 x_j 的初始状态。

2.1.2 一致性算法在交直流微电网优化模型中的应用

考虑一致性算法的“点”对“点”通信拓扑,即智能体单元只能与邻接连通单元交互信息^[17],在交直流混合微电网中设计 2 个监测点实现并网联络线与换流联络线约束条件,则其余约束条件都是可控单元的本地约束,即智能体单元的内部信息。同时设计在交直流微电网能够自消纳时, $P_{\text{Grid}}=0$,而系统能量不足时通过与 PCC 的通信实现并网购电环节。

a. 等微增率一致性算法。

根据拉格朗日乘子与 Karush-Kuhn-Tucker 条件^[16]可知,第 1 节所述交直流混合微电网优化模型在仅有有功平衡约束、同步电机运行约束和储能装置运行约束的条件下,系统的目标函数最优值即为边际成本函数取值相等的情况,即所知的“等微增率准则”。

“等微增率准则”在交直流混合微电网能量管理问题中定义为可控成本单元在系统运行中按照相等的耗量微增率运行,从而使系统的可控成本最小,运行最经济。本文中可控单元为同步电机和储能装置,其成本函数满足等微增率准则使用条件,因而将微增率作为系统状态量,则优化目标转换为式(14)所示的一致性算法模型,其证明机理见附录 A; $f_i(k)$ 是调整有功平衡约束的调整项,其证明机理见附录 B,如式(15)所示。

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j \in N} d_{ij} \lambda_j(k) + \varepsilon_i f_i(k) \quad (14)$$

$$f_i(k+1) = \sum_{j \in N} v_{ij} f_j(k) - (P_i(k+1) - P_i(k)) + (P_{\text{Di}}(k+1) - P_{\text{Di}}(k)) \quad (15)$$

其中, d_{ij} 为单元 i 与邻近单元 j 的通信权重,定义为“一致项”系数; ε_i 为误差调整系数; v_{ij} 为单元 i 与邻近单元 j 的调整权重,定义为调整项系数; $P_i(k+1)$ 和 $P_{\text{Di}}(k+1)$ 分别为单元 i 在 $k+1$ 时刻的实测有功出力和实测本地有功需求。

b. “一致性+调整项”算法的参数选取原则。

“一致项+调整项”算法的收敛性与可信度取决于 d_{ij} 、 v_{ij} 和 ε_i 这 3 个参数的选取。一致项系数 d_{ij} 影响一致性算法的收敛速度,本文按照单元的可控性,分配单元的权重 ρ_i 的高低^[16]如式(16)所示;可控单元权重取较高数值(如 0.5),承担一致性协调的任务;不可控单元权重取较低数值(如 0.1),仅承担信息流通的功能。

$$d_{ij} = \begin{cases} \rho_i & j=i \\ (1-\rho_i)/m_i^{\text{in}} & j \in N_i^{\text{in}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中, ρ_i 为单元 i 的一致项权重系数; m_i^{in} 为单元 i 的输入型邻居数; N_i^{in} 为输入型智能体单元的集合。

调整项系数 v_{ij} 的选取满足一定条件^[16]时,式(15)即可满足有功功率平衡约束条件,保证该一致性算法的可信度。 v_{ij} 按照式(17)取值。

$$v_{ij} = \begin{cases} \rho_i' & j=i \\ (1-\rho_i')/m_i^{\text{out}} & j \in N_i^{\text{out}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

其中, ρ_i' 为单元 i 的一致项权重系数; m_i^{out} 为单元 i 的输出型邻居数; N_i^{out} 为输出型智能体单元的集合。

误差调整系数 ε_i 的意义是调整交直流混合微电网系统的功率平衡误差,其取值大小影响一致性算法的收敛性。当 ε_i 取值较大时,收敛速度快,但容易导致系统失稳;当 ε_i 取值较小时,收敛速度慢,但收敛精度高。本文仿真中将通过反复实验选择合理的 ε_i 值。

根据式(14)一致性算法得到单元设备的微增率 $\lambda_i(k+1)$,利用边际成本函数得到上层的优化功率信息 $P_i^*(k+1)$:

$$P_i^*(k+1) = \begin{cases} P_i^{\text{max}}(k+1) & \tilde{P}_i(k+1) > P_i^{\text{max}}(k+1) \\ P_i^{\text{min}}(k+1) & \tilde{P}_i(k+1) < P_i^{\text{min}}(k+1) \\ \tilde{P}_i(k+1) & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\tilde{P}_i(k+1)$ 为可控单元在不含约束条件下的出力计算值, $\tilde{P}_i(k+1) = (\lambda_i(k+1) - b_i) / a_i$ 。

2.2 基于一致性算法的二次协调算法

在交直流混合微电网中,交流子微电网与直流子微电网的换流联络线是交直流混合微电网安全稳定运行的枢纽。当联络线发生故障时,交流子微电网与直流子微电网分别孤立运行,子微电网各自通过一致性算法进行能量管理,可视为交流微电网或直流微电网的能量管理。目前,这种研究较多,本文将不再进行讨论,本文主要分析联络线正常运行情况。

在交直流混合微电网基于一致性算法优化管理的过程中,换流联络线的传输功率时刻被监测,规定从交流子微电网向直流子微电网传输为功率正方向。当换流联络线传输功率越限时,按照下述算法(以交流子微电网向直流子微电网传递功率为例)进行各个可控单元出力的二次协调,此时将牺牲全局最优,以交、直流子微电网分别最优实现优化管理。

监测换流联络线的传输功率 $P_{\text{AC-DC}}$,若 $P_{\text{AC-DC}} > P_{\text{AC-DC}}^{\text{max}}$,则令 $P_{\text{AC-DC}} = P_{\text{AC-DC}}^{\text{max}}$ 。

a. 在二次协调一致性算法中更新各子微电网内本地负荷有功需求实测值为虚拟值。

交流子微电网:

$$\tilde{P}_{Di} = P_{Di} + \frac{P_{AC_DC}^{\max}}{m}$$

直流子微电网:

$$\tilde{P}_{Di} = P_{Di} - \frac{P_{AC_DC}^{\max}}{m}$$

其中, m 为交流子微电网单元数目。

b. 交流子微电网和直流子微电网分别基于内部的一致性算法协调可控单元的出力, 此时各单元仅在子微电网内部通信。

2.3 基于本地信息调整的电压频率控制

可控单元主要采用下垂控制方法, 使其下垂系数具有自适应能力。在调节有功出力的同时, 确保交流侧频率与直流侧电压恒定, 从而保证交直流混合微电网的安全运行。

交直流混合微电网基于本地信息的水下垂控制原理如图 4 所示, 交流侧下垂控制侧重频率与有功功率的关系, 即 $f_i - P_i$ 控制, 而直流侧则是电压与有功功率的关系, 即 $U_i - P_i$ 控制。交流侧频率和直流侧电压的无差调节, 要求可控单元的水下垂系数满足式 (19), 上层优化的功率传递给下层单元控制实现下垂控制系数的实时调整, 以提高稳定性。

$$P_i(k+1)m_{i,k+1} = P_i(k)m_{i,k} \quad (19)$$

其中, $m_{i,k}$ 和 $m_{i,k+1}$ 分别为可控单元 i 在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的水下垂系数。

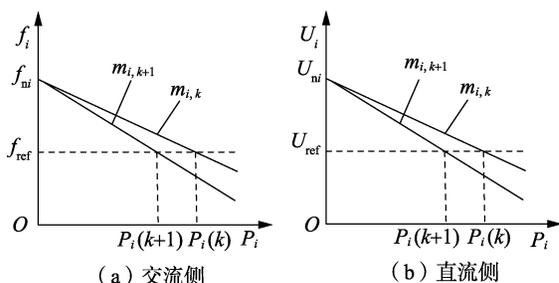


图 4 自适应下垂控制原理

Fig.4 Principle of adaptive droop control

3 算例分析

本文通过交直流混合微电网并网和孤网 2 种运行模式仿真验证该一致性协调优化管理系统的有效性和交直流混合微电网的运行特性。针对低压交直流混合微电网, 其简单级联和嵌套系统可等效为简单的负荷或者源, 同时电力电子设备的减少能提高其经济性, 因此将图 1 简化为图 5 所示的交直流混合微电网典型仿真结构图, 并在 MATLAB/Simulink 平台上搭建该仿真算例, 每个单元(单元①—⑧)可定义为一个智能体单元以实现与相邻单元的信息交互和本地的信息反馈。其中, 风机(单元①)和光伏(单元⑤)为不可控单元, 小机组(单元②、③、⑥和

⑦)和储能装置(单元④和⑧)为可控单元。设置交流子微电网的相电压为 380 V, 频率为 50 Hz; 直流子微电网的直流母线电压为 380 V。

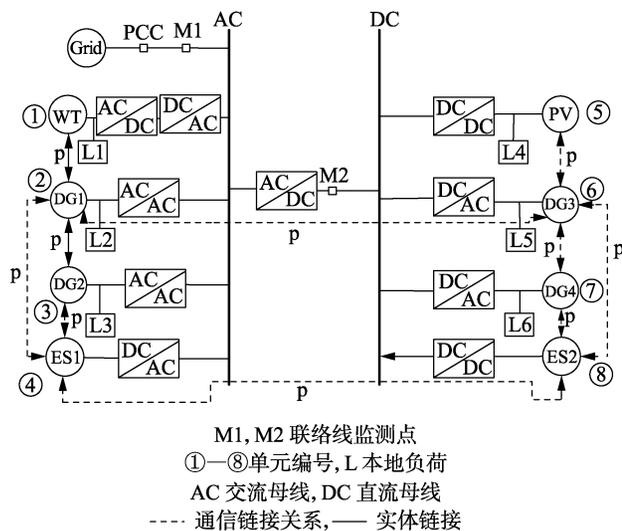


图 5 交直流混合微电网仿真结构

Fig.5 Simulation structure of AC/DC hybrid microgrid

本文所涉及的交直流混合微电网仿真结构采用“点”对“点”分布式通信方式, 通信网络的连通性是一致性控制收敛的前提条件, 即系统中不允许存在孤立节点。通信网络的拓扑结构可以根据需要设定, 但不同的通信拓扑影响一致性控制效果: 网络连通度越强, 控制算法收敛速度越快, 但鲁棒性变差^[17]。在交直流混合微电网中, 由于涉及 2 个子系统及其连接关系, 包含负荷与分布式电源种类及特性各不相同, 导致通信网络的设计要考虑更多的因素: 如根据分布式电源的可控度分配一致性系数, 考虑子微电网内存在的简单嵌套、级联关系设计复杂的连通度。同时, 通信延迟可能进一步影响一致性算法的控制速度与控制精度, 降低交直流混合微电网的稳定性。此类问题本文中不具体讨论, 本文考虑风机与光伏的不可控性和 2 个子微电网间的换流联络线, 选取如图 5 虚线信息流所示的通信拓扑, 其中虚线模拟 8 台分布式电源之间的通信关系, 2 条主联络线设置功率监测点, 保证联络线的安全性。当 M2 监测到联络线达容限时, 单元②与单元⑥间的通信、单元④与单元⑧间的通信均可断开, 在其他通信关系不变的基础上, 形成各子微电网二次协调一致性算法的通信拓扑。

本文中的交直流混合微电网为低压系统, 故设置微电网系统与大电网的联络线容量为 120 kW, 交流子微电网与直流子微电网联络线容量为 60 kW。图 5 中各台发电机与储能装置的参数如表 1 所示, 各单元所带的负荷初始值如表 2 所示, 光伏单元最大出力为 100 kW, 风机单元最大出力为 150 kW, E_s^{\min} 与 E_s^{\max} 分别为 10 kW·h 与 90 kW·h, η_{s1} 和 η_{s2} 均

为 0.9, ε 通过反复实验选取 0.000 5。

表 1 各类型发电机与电池参数

对象	a_i	b_i	$\Delta P_{d,i}$	$\Delta P_{u,i}$	出力范围/kW
DG1	0.08	2	0.6	0.3	[0, 300]
DG2	0.06	3	0.8	0.4	[0, 200]
DG3	0.07	4	0.5	0.2	[0, 100]
DG4	0.06	3	0.8	0.4	[0, 200]
ES1	0.36	—	∞	∞	[-30, 30]
ES2	0.20	—	∞	∞	[-50, 50]

表 2 各单元所带负荷初值

单元编号	负荷初值/kW	单元编号	负荷初值/kW
①	130	⑤	60
②	150	⑥	150
③	200	⑦	100
④	0	⑧	0

为检验一致性协调优化管理系统的管理特性、在负荷需求或光伏/风机出力扰动时交直流微电网的运行特性,以及并网模式下与大电网的协调性和换流联络线达容限二次协调的有效性,本文设计如下 3 种仿真情景:情景 A,并网模式下负荷需求和光伏出力扰动;情景 B,并网模式下微电网内部供电不足;情景 C,孤岛模式下负荷需求扰动和换流联络线达到容量限值。

3.1 情景 A:并网扰动分析

交直流混合微电网按上述初始条件运行,可控单元采用 2.3 节所述的标么值下垂控制,取 200 kW 有功功率为基准值。模拟 $t=5$ s 时单元⑦的本地负荷由 100 kW 突增到 200 kW 以及 $t=10$ s 时光伏出力由于光照强度增强而变为 150 kW 这 2 种情况下,一致性协调优化管理系统的有效性。

仿真结果如图 6 所示(图中有功出力、直流母线电压为标么值),初始阶段可控机组受爬坡率的影响响应速度较储能单元略慢,两者基于一致性算法相互协调,在 $t=0.5$ s 时系统达到经济最优运行状态,此时 $\lambda=12.258 2$,可控单元②—④、⑥—⑧的有功出力分别为 128.23、128.63、30、100、128.63、24.52 kW,其中单元④和⑥都已达到容量限值。 $t=5$ s 时,有功需求突然增大,可控单元基于一致性算法协调出力,单元②、③、⑦和⑧的有功需求分别增加至 169.41、169.81、169.81、31.11 kW。 $t=10$ s 时,光伏出力突然增大,可控单元基于一致性算法协调出力,单元②、③、⑦和⑧的有功需求分别减至 153.31、153.71、153.71、32.53 kW。由 2 次扰动分析可知,该一致性协调优化管理算法能有效协调可控单元的出力,达到经济最优运行。扰动分析过程中,由于并网运行模式,交流子微电网的频率和电压幅值依托大电网的支撑而始终稳定,故观测直流母线电压的稳定性。由仿真结果可知,主逆变器的 P/U 控制和直

流侧下垂控制的双向作用使得在并网运行模式下,交直流混合微电网受到扰动,可控单元出力调整时,直流母线电压能有效抑制暂态冲击,提高动态性能,在 1 s 内恢复稳定;即使光伏单元的最大功率跟踪控制未设置二次电压控制,光伏扰动时,系统直流母线的暂态冲击也能抑制到 1.08 p.u.,仍能在 1.5 s 内恢复稳定,交直流混合微电网在扰动时仍能保持良好的运行特性,维持直流母线电压的恒定。

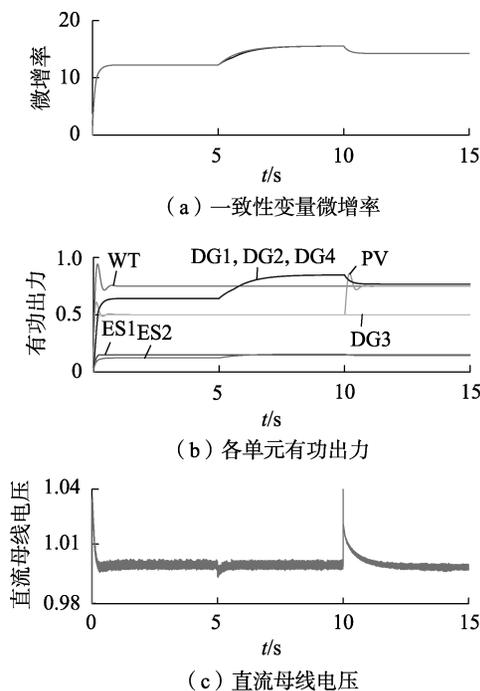


图 6 并网仿真结果图

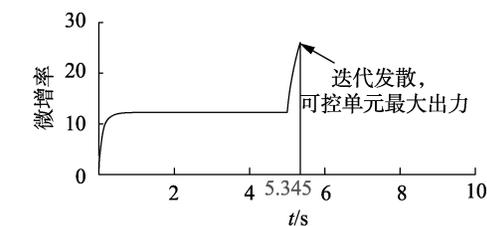
Fig. 6 Simulative results of grid-connected operation

3.2 情景 B:并网购电分析

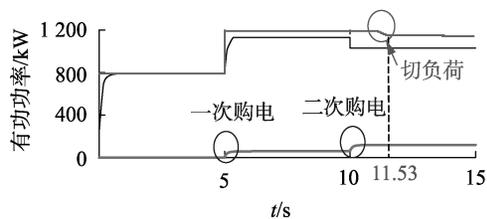
交直流混合微电网按照上述的初始条件运行,可控单元采用 2.3 节所述的标么值下垂控制,取 200 kW 有功功率为基准值。模拟 $t=5$ s 时单元④和⑧各接入一个功率为 200 kW 的负荷后交直流混合微电网的购电情况,以及 $t=10$ s 时单元⑤的 DG3 因故障退出交直流混合微电网后该系统的能量管理情况。

仿真结果见图 7, $t=5$ s 时,系统有功需求增加,可控单元基于一致性算法协调出力,但 $t=5.35$ s 时可控单元均达到容量限值,微增率发散,负荷总需求与微电网系统总出力不平衡,需要向大电网反馈功率缺值。 $t=5.37$ s 时,大电网协调出力,5.8 s 后微电网再次实现供需平衡,完成并网购电行为。 $t=10$ s 时,单元⑤的 DG3 因故障退出运行,则微电网系统的总出力降低 100 kW,无法满足负荷总需求,交直流混合微电网再次向大电网购电,当 11.12 s 时,交直流微电网与大电网的联络线达到容限 120 kW,仍无法满足所有负荷的需求,此时,系统需要进一步切除负荷以实现系统的供需平衡,在本算例中,设单元

⑦的负荷为不重要负荷,采取每 0.1 s 切除 10%的负荷比例,则 0.4 s 后系统再次恢复供需平衡。



(a) 并网环节,系统内部功率不平衡使一致性算法发散



(b) 一次购电与二次购电并网联络线达容限时系统的功率
— 微电网系统总出力, — 负荷总需求, — 大电网出力

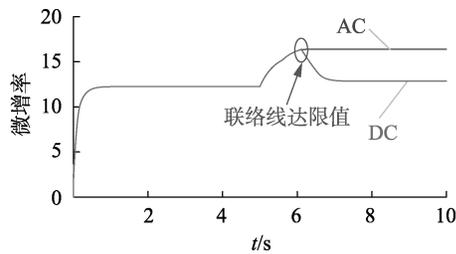
图 7 并网仿真结果图

Fig.7 Simulative results of grid-connected operation

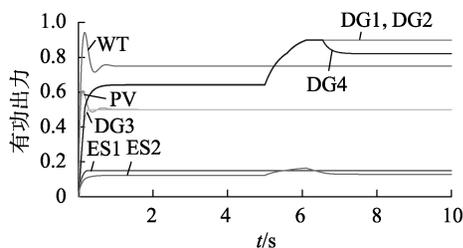
3.3 情景 C: 孤网运行分析

交直流混合微电网按照上述的初始条件孤网运行,可控单元采用 2.3 节所述的标幺值下垂控制,取 200 kW 有功功率为基准值。模拟 $t=5$ s 时单元⑧接入一个功率为 150 kW 的负荷后交直流混合微电网的运行情况。

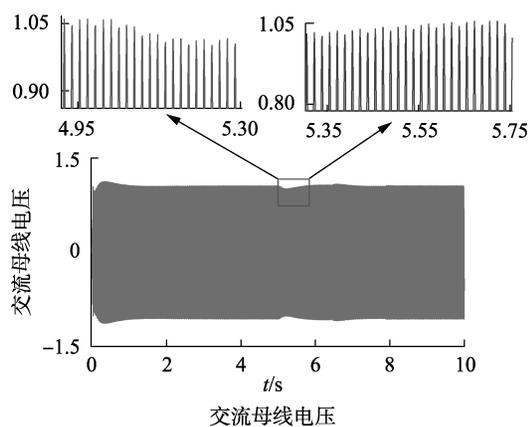
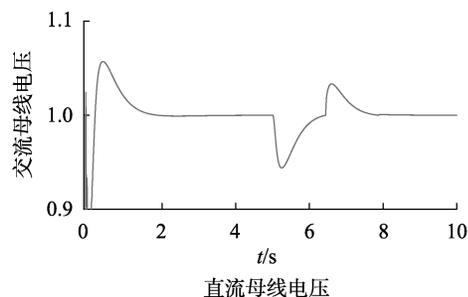
仿真结果如图 8 所示(图中有功出力、电压为标幺值)。从图 8(a)可见, $t=5$ s 时,系统有功需求增加,可控单元基于一致性算法协调出力。当 $t=6.1$ s 时,换流联络线监测器 M2 监测到其传输功率即将达到容限,基于一致性算法二次协调可控单元的出力,此时交流子微电网和直流子微电网基于更新的负荷信息内部通信协调,以保证联络线的安全性。当 $t=7.2$ s 时,2 个子微电网系统分别达到经济最优,微增率分别为 $\lambda_{AC} = 16.384 0$ 和 $\lambda_{DC} = 12.853 7$,可控单元②—④、⑥—⑧的有功出力分别为 179.80、180.20、30、100、164.22、25.71 kW。二次协调一致性算法的通信网络由于其通信设备较少和通信连通度高,其收敛速度较快。孤网运行时,直流母线电压主要依靠可控单元的下垂控制维持稳定,而交流母线电压通过主变流器和可控单元的下垂控制共同维持稳定。从图 8(b)、(c)可知,系统受到扰动时,在下垂控制的作用下,直流母线电压能有效抑制暂态冲击,抑制在 (380 ± 20) V,在 1 s 内能恢复稳定值 380 V;同理,交流母线电压幅值能有效抑制到波动范围 360~400 V,交流母线频率维持在 (50 ± 0.02) Hz,符合我国《电力系统安全稳定导则》频率偏差 ± 0.5 Hz 以内的要求。该控制方法具有良好的暂态和稳态性能,使混合微电网保持良好的运行特性。



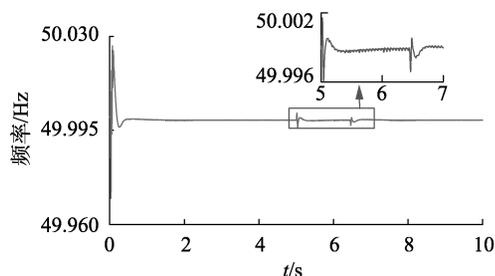
一致性算法在子微电网间联络线达容限时,二次协调优化过程的收敛曲线图



各单元有功出力
(a) 上层一致性优化管理



(b) 直流母线电压与交流母线电压



(c) 交流母线频率

图 8 孤网仿真结果图

Fig.8 Simulative results of isolation operation

通过 3 个算例的仿真分析可知:该一致性协调

优化管理系统在交直流混合微电网并网与孤网运行时,都能够有效实现系统稳定运行,通过一致性算法的功率分配能实现系统的经济最优。在换流联络线达到容量限值时,二次协调控制降低经济性以保证系统安全性。在系统受到扰动时,底层下垂控制与主变换器的双重作用能始终维持系统的良好运行特性。在仿真过程中,当系统发生扰动(负荷需求或分布式电源出力)时,蓄电池响应速度较小组略快,系统在一致性算法的管理下都能快速抑制暂态冲击,在2 s内恢复系统的电压与频率稳定;多种控制方法的采用和控制器的设计使参数选择存在复杂性,但是能更好地保证系统的稳定性,优化参数设计是底层控制方法急需解决的问题;当负荷需求扰动较小时,一致性算法中的“调整项”补偿过度,算法发散,此时要调节 ε 数值以保证算法的收敛性, ε 的自适应值得进一步深入探讨;间隔采点、合理选取数据能加快仿真速度,本文中每0.001 s采集一次 P_i 和 P_{Di} ,实施一致性算法。

4 结论

本文针对交直流混合微电网中集中式通信的鲁棒性和集中式管理的灵活性与可拓展性不强等弊端,提出一种一致性协调优化管理系统。该系统主要分为2层:上层基于一致性算法优化功率分配,实现系统的经济最优;下层基于本地信息修正下垂控制,维持系统的稳定性。同时,该管理系统的二次协调优化算法在交、直流子微电网局部经济最优的情况下保证了换流联络线的安全性。通过3组算例的仿真分析,验证了该管理系统的有效性:在管理方法上,一致性算法实现了系统经济最优运行;在控制机制上,主变换器与基于本地信息的修正下垂控制使系统具有良好的稳态性能;在通信方式上,“点对点”的分布式通信替代了“中心对多点”的集中通信,增强了系统的鲁棒性。

该管理系统可进一步应用于具有更复杂结构的多微电网系统、交直流混合配电网和能源互联网,但该方法未开展通信时间延迟、信息丢包、通信链路故障等问题的深入讨论。因而,通信链路的优化、通信时间的选取、收敛系数的自适应等问题可作为本文的后续研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] ASSETER L R H. Microgrids[C]//Power Engineering Society Winter Meeting 2002. New York, USA; IEEE, 2002: 305-308.
 [2] 田军,刘征宇,舒军,等.适用于工业园区的微电网系统能量管理[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 45-50.
 TIAN Jun, LIU Zhengyu, SHU Jun, et al. Energy management for microgrid system of industrial park[J]. Electric Power Automation

Equipment, 2016, 36(11): 45-50.
 [3] ZHANG L, LI Y. Optimal energy management of wind-battery hybrid power system with two-scale dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 765-773.
 [4] HOSSEINZADEH M, SALMASI F R. Robust optimal power management system for a hybrid AC/DC micro-grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1-13.
 [5] GUO L, ZHANG S, WANG C, et al. Hierarchical coordination control for DC microgrid considering time-of-use price[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1992-2000.
 [6] KHODAEI A. Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 1584-1591.
 [7] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
 [8] ZHANG Z, CHOW M. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1761-1768.
 [9] 谢俊,陈凯旋,岳东,等.基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 112-117.
 XIE Jun, CHEN Kaixuan, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 112-117.
 [10] LU Xiaonan, GUERRERO J M, SUN Kai, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
 [11] 吕振宇,吴在军,窦晓波,等.基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4397-4407.
 LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4397-4407.
 [12] 颜湘武,王月茹,王星海,等.基于动态一致性的分布式微源并联控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 17-21.
 YAN Xiangwu, WANG Yueru, WANG Xinghai, et al. Parallel control based on dynamic consistency for distributed micro-sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 17-21.
 [13] XU Yinliang, LI Zhicheng. Distributed optimal resource management based on the consensus algorithm in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2584-2592.
 [14] 苏晨,吴在军,吕振宇,等.基于边际成本下垂控制的自治微电网分布式经济运行控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 59-66.
 SU Chen, WU Zaijun, LÜ Zhenyu, et al. Droop control based on marginal cost for distributed economic operation of islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 59-66.
 [15] WANG P, LIU X, JIN C, et al. A hybrid AC/DC micro-grid architecture, operation and control[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA; IEEE, 2011: 1-8.
 [16] HUG G, KAR S, WU C. Consensus + innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1893-1903.
 [17] 吴莹.基于稀疏通信网络的微网分布式电源微增率一致性加速算法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.

WU Ying. Incremental cost consensus acceleration algorithm for distributed generators under sparse communication network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

作者简介:

何红玉(1992—),女,上海人,硕士研究生,研究方向为交直流混合微电网优化运行关键技术(**E-mail**:HHY_1992@sjtu.edu.cn);



何红玉

韩蓓(1984—),女,上海人,博士,通信作者,主要研究方向为含新能源接入的电力系统分析、微电网分析与控制(**E-mail**:han_bei@sjtu.edu.cn);

徐晨博(1989—),男,浙江丽水人,工程师,硕士,主要研究方向为智能电网与能源互联网(**E-mail**:zjlsxcb@163.com)。

Optimal management system of hybrid AC/DC microgrid based on consensus protocols

HE Hongyu¹, HAN Bei¹, XU Chenbo², ZHANG Lijun², LI Guojie¹, WANG Keyou¹

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

2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute of Economy and Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Considering the high penetration of distributed generations, the power management of hybrid AC/DC microgrid is necessary for coordinative operation of distributed generations. Aiming at the insufficient robustness and flexibility of centralized optimization, an optimal management system based on the consensus protocol is proposed according to the characteristics of hybrid AC/DC microgrid, which takes the minimum cost of controllable units as its objective, sets the incremental rates as the variables of consensus protocols, and allocates the power among controllable units based on “consensus + modulation” algorithm. The droop control adjusts the parameters based on the local information to maintain the system stability. The simulative results of a typical hybrid AC/DC microgrid show that the proposed system, with good transient and stable performance, can allocate power economically and depress voltage and frequency fluctuations quickly.

Key words: hybrid AC/DC microgrid; optimal management; consensus algorithm; droop control

(上接第130页 continued from page 130)

及检修策略制定[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3342-3347.

BIAN Jianpeng, SUN Xiaoyun, YANG Su, et al. Risk assessment and working-out of maintenance strategy for power transformer based on cloud model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3342-3347.

[21] 黄定轩. 基于客观信息熵的多因素权重分配方法[J]. 系统工程理论方法应用, 2003, 12(4): 321-324

HUANG Dingxuan. Means of weights allocation with multi-factors based on impersonal message entropy[J]. Systems Engineering-Theory Methodology Applications, 2003, 12(4): 321-324.

作者简介:



熊卫红

熊卫红(1971—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为设备状态检修;

张宏志(1993—),男,湖北黄梅人,硕士研究生,通信作者,主要从事高电压与绝缘、变压器状态检修方面的研究(**E-mail**:

hongzhi_zhang@hust.edu.cn)。

Risk assessment of power transformer potential fault based on cloud theory and entropy weight method

XIONG Weihong¹, ZHANG Hongzhi², XIE Zhicheng², HAN Xionghui³, LI Zhengtian², LIN Xiangning²

(1. Central China Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Meizhou Power Supply Bureau of Guangdong Electric Power Company, Meizhou 514021, China)

Abstract: In order to identify the potential fault risk of power transformer effectively by making full use of the information contained in the large amount of samples, the oil chromatographic data of power transformer and fault types are mapped by adopting the cloud theory method, and the cloud distribution models of different gases under different fault types are established, based on which the fault cloud knowledge base is set up. Meanwhile, the weight coefficients of the indicators for gases in the oil are determined by introducing the entropy weight method and the calculation method for potential fault risk of power transformer is proposed combining with the membership degree of cloud distribution. The distinguishing-positive rates under different amounts of training sample are compared, which verifies the ability of the proposed method to learn data. The validity and superiority of the proposed method are proved by comparing with the improved three-ratio method and the existing cloud theory method.

Key words: power transformers; data mining; potential faults; risk assessment; cloud theory; entropy weight method

附录 A

经济最优性的证明过程：

凸优化问题：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i \in N} C_i(P_i) \\ & st : \begin{cases} \sum_{i \in N} P_i = \sum_{i \in M} P_{Di} - P_{wind} - P_{pv} = \text{瞬时常数} & \text{记作等式约束 } h(x) = 0 \\ P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, & \text{记作不等式约束 } g(x) \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

一般方法求解该问题的拉格朗日表达式：

$$L = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_i \right) + \sum_{i=1}^N \bar{\mu}_i (P_i - P_i^{\max}) + \sum_{i=1}^N \underline{\mu}_i (-P_i + P_i^{\min})$$

其中， λ 、 $\bar{\mu}_i$ 和 $\underline{\mu}_i$ 分别为功率约束和可控单元本地运行约束的拉格朗日乘子。

根据拉格朗日乘子的 KKT 条件可知，目标最优需满足以下 3 个条件：

- a. $a_i P_i + b_i - \lambda + \bar{\mu}_i - \underline{\mu}_i = 0$
- b. 等式约束 $h(x) = 0$
- c. $\mu g(x) = 0$

满足条件 c，则要求 $\mu=0$ 或者 $g(x)=0$ ，当所有的不等式约束 $g(x) \neq 0$ 时，若 $a_i P_i + b_i = \lambda_i$ ，系统的经济最优，且所有的 λ_i 相等，即传统电力系统中所描述的“等微增率法则”。

一致性算法的具体形式按照文中式 (11) 所示，作用是使系统的状态变量 x_i 收敛于一个固定值 x^* 。故本文设置微增率 λ_i 为状态变量，则通过一致性算法，所有的 λ_i 收敛于相等值 λ^* ，即上述等微增率法则，故可以体现出所研究的交直流混合微电网的经济最优。当某一可控单元的 λ_i 无法收敛到固定值时，则表明此单元的功率输出达到上限或者下限，可控单元的输出功率的具体数值参考文中式 (18)。

附录 B

简便起见，将式 (15) 写成矩阵形式：

$$\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{V}\mathbf{f}(k) - (\mathbf{P}(k+1) - \mathbf{P}(k)) + (\mathbf{P}_D(k+1) - \mathbf{P}_D(k))$$

$$\mathbf{1}^T \mathbf{f}(k+1) = \mathbf{1}^T \mathbf{V}\mathbf{f}(k) - \mathbf{1}^T (\mathbf{P}(k+1) - \mathbf{P}(k)) + \mathbf{1}^T (\mathbf{P}_D(k+1) - \mathbf{P}_D(k))$$

其中， $\mathbf{1}^T$ 为与 \mathbf{V} 维数相等的单位行向量，根据矩阵的乘法特性： $\mathbf{1}^T \mathbf{V}$ 为将 \mathbf{V} 各列中的元素相加。由于 \mathbf{V} 为非负列随机矩阵，即各列向量中的元素非负且相加和为 1，因此 $\mathbf{1}^T \mathbf{V} = \mathbf{1}^T$ 。则：

$$\begin{aligned} \mathbf{1}^T \mathbf{f}(k+1) &= \mathbf{1}^T \mathbf{V}\mathbf{f}(k) - \mathbf{1}^T (\mathbf{P}(k+1) - \mathbf{P}(k)) + \mathbf{1}^T (\mathbf{P}_D(k+1) - \mathbf{P}_D(k)) \\ \Rightarrow \mathbf{1}^T (\mathbf{f}(k+1) + \mathbf{P}(k+1) - \mathbf{P}_D(k+1)) &= \mathbf{1}^T (\mathbf{f}(k) + \mathbf{P}(k) - \mathbf{P}_D(k)) \end{aligned}$$

将上式还原成变量表达式，即为：

$$\sum_{i \in N} (P_i(k+1) - P_{Di}(k+1) + f_i(k+1)) = \sum_{i \in N} (P_i(k) - P_{Di}(k) + f_i(k))$$

在设置初值时使 $\sum_{i \in N} (P_i(0) - P_{Di}(0) + f_i(0)) = 0$ 即可保证系统的有功功率平衡，在计算过程中， f_i 作为系统的负反馈会向 0 收敛。