



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Wang, Haojie; Han, Minxiao; Guerrero, Josep M.; Luan, Wenpeng

Published in:
Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao

Publication date:
2016

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Wang, H., Han, M., Guerrero, J. M., & Luan, W. (2016). . *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

基于自律分散系统的直流微电网 稳定控制器优化设计

王皓界¹, 韩民晓¹, Josep M. Guerrero², 栾文鹏³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 奥尔堡大学能源技术系, 丹麦 9220;
3. 中国电力科学研究院, 北京市 100192)

Optimization Design of DC Micro-grid Stability Controller Based on the Autonomous Decentralized System

Haojie Wang¹, Minxiao Han¹, Josep M. Guerrero², Wenpeng Luan³

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Department of Energy Technology, Aalborg University 9220, Denmark;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing, 100192, China)

ABSTRACT: DC Micro-grid Stability Controller (SC) which is connected with storage plays an important role in DC micro-grid. However, the converter losses will be increased when the load is light under the condition of island operation while multi SCs are parallel operating. In order to increase the efficiency when multi SCs parallel operating, the optimization scheme based on the autonomous decentralized system is proposed. Every SC can receive the other SCs information by logical operation iterative algorithm, thus binding local voltage detection the quantity and droop characteristic of operating SC can be real time regulated. Ensuring micro-grid steady operation under the condition of grid connected and the condition of island, all the running SCs efficiency will approximate to maximum and the globe efficiency optimization can be realized. Based on optimizing, every SC can self adaptively regulate its droop characteristic, and the optimization effect will be more obvious as the load decreases.

KEY WORDS: DC micro-grid; Stability Controller; autonomous decentralized system; droop control; efficiency optimization; logical operation iterative algorithm

摘要: 基于储能的直流微电网稳定控制器(DC Micro-grid Stability Controller, SC)在直流微电网中发挥重要作用,但是在孤网轻载条件下多台SC同时运行会引起较大的换流损耗。为了提高多SC并联运行时的全局效率,本文提出了基于自律分散系统的优化方案,各SC通过逻辑运算迭代算法得到全局SC信息,再结合本地直流母排电压信息调节SC运行数量及其下垂曲线特性,在保证直流微电网并网、孤网条件下稳定运行的同时对各换流器输出电流进行实时调节,使运

行的SC都工作在效率最高点附近,实现SC效率的全局优化。通过优化,各SC能够根据直流母排电压自适应调节其下垂特性,并且负载越轻,优化效果越明显。

关键词: 直流微电网; 稳定控制器; 自律分散系统; 下垂控制; 效率优化; 逻辑运算迭代算法

0 引言

以可再生能源为主的分布式发电方式为缓解环境压力、应对能源紧张提供了一种有效的途径。但是直接将分布式电源接入主网可能会对主网的稳定性和电能质量造成影响。实践和研究表明,微电网是利用分布式发电供电的最有效方式,并且与交流微电网相比,直流微电网的优势更加明显^[1-4]。

储能作为直流微电网的重要组成部分,能够在交流主网无法为直流微网提供电压支撑时起到稳定直流微电网电压的作用。文献[5-6]搭建了一个直流微网物理平台,证实了直流微电网在孤网状态下能够正常运行,但是没有考虑孤网与并网的相互转换。文献[7]提出了一种基于多代理系统的控制策略,在大量通信的基础上实现了直流微网能量的分层管理。文献[8]提出了一种多层微电网结构,结合相应的控制策略最终可以通过储能电池与光伏电池的配合实现可再生能源的充分利用。文献[9-10]认为直流微电网中,包括储能在内的各个单元可以通过检测直流母排电压调整自身工作方式,在没有相互通信的情况下实现直流微电网的稳定运行。在分

基金项目: 国家国际科技合作专项 (2014DFG72620)。

This work was supported by International S&T Cooperation Program of China (2014DFG72620).

析直流微网的构成以及各种运行模式的基础上,文献[11]提出了电压分层协调控制策略,各换流器独立工作,无需相互通信,可简化控制系统结构,并使直流微网具备“即插即用”的功能。

当直流微电网由并网转为孤网时,微电网中的储能往往需要向直流微电网输出功率,通过自身有限的电能支撑起直流微电网电压,因此,在放电状态下对储能电池换流效率的全局优化就显得至关重要。文献[12-14]提出了一种分级下垂控制,在较少通信的基础上,通过对各个换流器下垂特性的调节,实现各换流器间的相互配合与优化,以保证直流母排电压稳定。在此基础上,文献[15]提出了一种基于多代理系统的优化控制策略,各供电单元通过动态一致性算法得到全局电流信息并重新分配电流,使得各个换流器运行效率得到优化。

本文对直流微电网储能电池在放电状态下的换流效率进行了全局优化,使换流损耗显著降低。储能电池通过 DC/DC 换流器与直流微电网相连,其主要作用是稳定直流微电网电压,因此本文称这种换流器为直微电网稳定控制器(DC Micro-grid Stability Controller, SC)。由于在孤网轻载条件下多台 SC 同时运行会引起较大的换流损耗,当系统中配置一定数量的 SC 并向外输出功率时,可以根据 SC 效率特性调节 SC 的工作数量,使运行的 SC 都工作在效率最高点附近。

与集中分层控制相比,自律分散系统每个单元都具有自律决策能力,某一单元出现故障不会影响到整个系统,但是在集中分层控制系统中,如果控制系统出现故障会导致整个系统无法正常运行;除此之外,若集中分层控制系统某一端子与控制中心的通信发生中断,则该端子将无法得到全局信息,而自律分散系统中即使某一通信线路发生中断,只要整个系统节点连通,则各单元依然可以得到全局信息,可靠性更好,因此本文提出了基于自律分散系统的优化方案,各 SC 通过逻辑运算迭代算法得到全局 SC 信息,并结合本地直流母排电压信息调节 SC 运行数量及其下垂曲线特性,在保证直流微电网并网、孤网条件下稳定运行的同时对各换流器输出电流进行实时调节,降低总的换流损耗,实现效率的全局优化。

1 SC 的拓扑与控制

典型的直流微电网系统如图 1 所示,交流主网

通过双向并网换流器(Grid Voltage Source Converter, G-VSC)与直流微电网相连,在并网条件下为直流微电网提供电压支撑。储能电池通过 SC 与直流母排相连,当 G-VSC 无法为直流微电网提供电压支撑时,SC 将会起到稳定直流电压的作用。SC 是一个经过三重化处理的双向 DC/DC 换流器,其拓扑如图 2 所示。

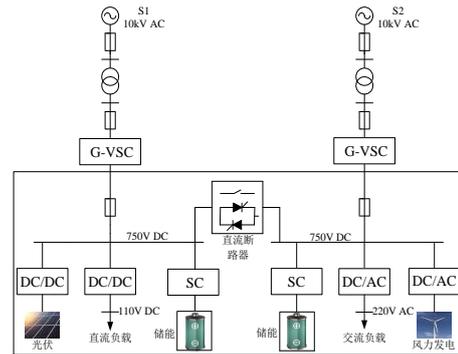


图 1 直流微电网架构

Fig. 1 DC microgrid architecture

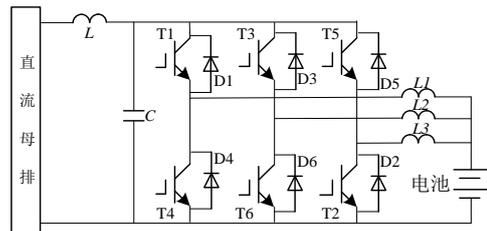
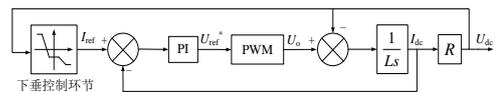
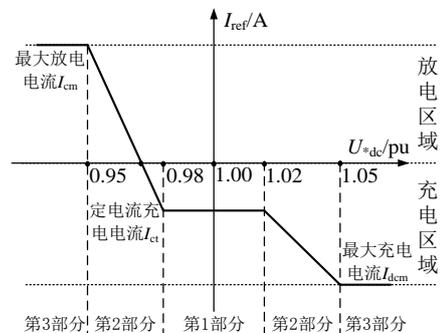


图 2 三相交错 DC/DC 换流器

Fig.2 Three-phase interleaved DC/DC converter



(a) SC 控制框图



(b) 下垂环节特性

图 3 SC 下垂控制策略

Fig.3 SC droop control strategy

SC 采用双闭环控制，内环为电流控制环，外环采用直流电压下垂控制，其控制框图如图 3(a)所示，其中 U_o 为 SC 母排侧电容电压， U_{dc} 为直流母排电压， I_{dc} 为 SC 的充放电电流， I_{ref} 为其参考电流， L 为输出侧的滤波电感， R 为负载侧等效电阻。 I_{ref} 与 U_{dc} (标么值)的下垂特性如图 3(b)所示，根据直流电压的变化量可以将下垂曲线分为三部分^[10]，图中选取电压分层切换点的门槛电压分别为 0.02 和 0.05。

2 SC 第一层优化

2.1 SC 优化原则

DC/DC 换流器效率大小与工作电流有关，典型的效率曲线如图 4 所示^[16]，其中 μ 为能量传递效率， i 为换流器的输出电流，容易看出 μ 、 i 之间存在以 i 为自变量、 μ 为因变量的函数关系，其中 i_{ex} 为 $\mu(i)$ 的极大值点。随着直流微电网容量的扩大，储能设备及相应的 SC 数量也会随之增加。可以根据效率曲线特性调节 SC 工作数量以实现第一层优化，使运行的 SC 都工作在效率最高点附近，从而实现效率的全局优化。

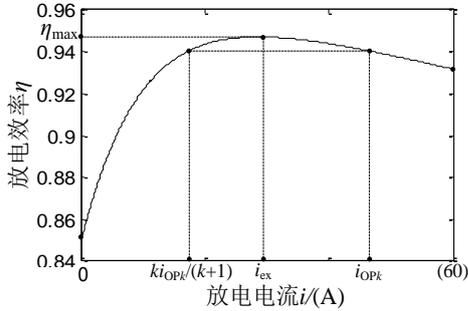


图 4 SC 效率曲线

Fig.4 SC efficiency curve

根据 SC 效率特性容易得到 SC 放电时的损耗

$$Q_{loss}(i) = \frac{[1 - \eta(i)]U_{dc}i}{\eta(i)} \quad (1)$$

其中 U_{dc} 为直流母排电压， i 为放电电流。由于 SC 正常工作时直流母排电压波动很小，因此可以将 U_{dc} 看作定值，并用下式表示其损耗

$$Q_o(i) = \frac{[1 - \eta(i)]i}{\eta(i)} \quad (2)$$

根据函数的曲线特性不难得出对于任意正整数 k ，都存在 $i_{OPk} > i_{ex}$ ，使

$$\mu(i_{OPk}) = \mu\left(\frac{ki_{OPk}}{k+1}\right) \quad (3)$$

其中

$$\frac{ki_{OPk}}{k+1} \in [0, i_{ex}] \quad (4)$$

设 k 台工作在放电状态下的 SC 输出总电流为 i_o ，结合图 4，由(2)、(3)、(4)可知当 $i_o < ki_{OPk}$ 时，有

$$Q_o\left(\frac{i_o}{k}\right) < Q_o\left(\frac{i_o}{k+1}\right) \quad (5)$$

当 $i_o > ki_{OPk}$ 时，有

$$Q_o\left(\frac{i_o}{k}\right) > Q_o\left(\frac{i_o}{k+1}\right) \quad (6)$$

由此可以得到 SC 全局优化的原则：若直流微电网中有 k 台 SC 投入运行且输出的总电流为 i_o ，当 i_o 升高至 ki_{OPk} 时，运行数量需增加至 $k+1$ 台；当 i_o 降低至 $(k-1)i_{OPk-1}$ 时，运行数量需减少至 $k-1$ 台。

2.2 SC 下垂特性调节

由 1.1 可知当 SC 工作在放电状态时， I_{ref} 与 U_{dc} 的下垂特性可以用下式描述

$$I_{ref} = k_c(U_{dc} - U_{ref}) \quad (7)$$

其中 k_c 为下垂系数， U_{ref} 为直流电压参考值即电压下垂曲线与 U_{dc} 轴的交点。当 SC 工作在放电区域时， U_{ref} 的变化规律如图 5 所示，其中 1 到 n 为投入运行 SC 的数量， U_N 为直流母排电压额定值。由图可知，对于任意 k 台并联运行的 SC，每台 SC 的直流电压参考值 U_{ref} 相同，结合(3)可以得到

$$U_{refk} = 0.98U_N + \sum_{j=1}^k \frac{i_{OPj-1}}{jk_c} \quad (8)$$

其中 i_{OP0} 为 SC 定充电电流值的大小，即 $i_{OP0} = |i_{ct}|$ ；根据 2.1 可知，若输出的总电流增加至 ki_{OPk} ，则第 $k+1$ 台 SC 投入运行，每台 SC 的输出电流由 i_{OPk} 变为 $ki_{OPk}/(k+1)$ ；若总电流减小至 $(k-1)i_{OPk-1}$ ，则第 k 台 SC 退出运行，每台 SC 的输出电流由 $(k-1)i_{OPk-1}/k$ 变为 i_{OPk-1} 。当运行台数发生变化时，结合(8)可以求得相应的直流电压参考值 U_{ref} ，运行的 SC 按照新的 U_{ref} 调节各台 SC 的下垂特性，从而优化 SC 的放电效率。

当 k 台 SC 投入运行时，由(7)、(8)和图 5 可知若每台 SC 输出电流为 i_{OPk} ，则直流母排电压为

$$u_k = U_{refk} + \frac{i_{OPk}}{k_c} \quad (9)$$

因此可以得到，若直流母排电压降低至 u_k ，则第 $k+1$ 台 SC 投入运行，且各直流电压参考值调整

为 $U_{\text{ref}k+1}$ ；若直流母排电压升高至 u_{k-1} ，则第 k 台 SC 退出运行，且各直流电压参考值调整为 $U_{\text{ref}k-1}$ 。不管运行的 SC 数量如何，各投入运行 SC 的下垂系数 k_c 相等且为定值，但由图 5 可知， k_c 与直流微电网中配置 SC 的总数量有关。令

$$\Delta i_k = i_{\text{OP}k} - \frac{(k-1)i_{\text{OP}k-1}}{k} \quad (10)$$

若微网中配置 n 台 SC，结合(8)、(10)可以得到

$$k_c = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta i_k}{0.95U_N - U_{\text{ref}1}} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta i_k}{-0.03U_N - \frac{i_{\text{OP}0}}{k_c}} \quad (11)$$

其中 $i_{\text{OP}n}$ 为最大放电电流值，即 $i_{\text{OP}n} = I_{\text{cm}}$ 。将(10)代入(11)可得

$$k_c = -\frac{i_{\text{OP}0} + \sum_{k=1}^n (i_{\text{OP}k} - i_{\text{OP}k-1} + \frac{i_{\text{OP}k-1}}{k})}{0.03U_N} = -\frac{I_{\text{cm}} + \sum_{k=1}^n (\frac{i_{\text{OP}k-1}}{k})}{0.03U_N} \quad (12)$$

根据以上分析可以看出对于直流微电网中配置的任意台 SC，在放电状态下都可以根据直流母排电压调节投入运行 SC 的台数及其下垂特性，从而实现 SC 输出功率的全局优化，降低换流损耗，提高储能的利用率。

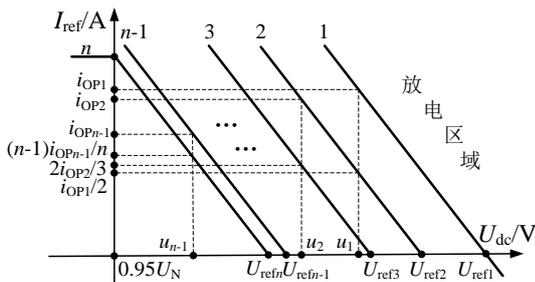


图 5 电压参考值变化规律

Fig.5 Voltage reference value variation

3 SC 第二层优化

3.1 自律分散系统体系结构

通过前文可知，各 SC 需要确定微网中配置 SC 的数量才可进行第一层优化。在实际工程中，SC 可能出现故障或 SOC 保护动作等情况导致其退出微电网，在故障排除后也有可能重新接入微电网，这些情况都会导致 SC 的配置数量发生改变，需要

重新调整 SC 投运次序及第一层优化的相关参数和下垂特性，这就是第二层优化需要实现的功能。

为了实现第二层优化，本文提出了基于自律分散系统^[17]的逻辑运算算法，实现了各 SC 对全局 SC 接入微电网信息(以下简称“接入信息”)的实时检测，并进行自律决策，优化相关参数和下垂特性，配合第一层优化最终实现全局优化。在自律分散系统中，各 SC 只与相邻的若干 SC 进行接入信息的交换，由于每台 SC 获得的信息量有限，因此需要通过一定算法实现对全局接入信息的掌控。

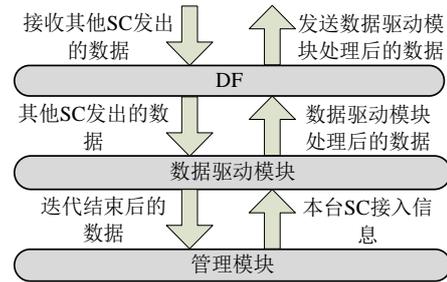


图 6 原子节点结构体系

Fig.6 Atomic node architecture

在自律分散系统中，每台 SC 都可以视为一个原子节点，每个原子节点的结构体系由管理模块、数据驱动模块和数据域(Data Field, DF)三部分组成，如图 6 所示。在各个原子节点交互信息时，管理模块将本节点的接入信息传给数据驱动模块，同时 DF 接收其他节点发出的全局接入信息并传给数据驱动模块。数据驱动模块对旧的全局接入信息和新接收的数据信息进行计算，得到新的全局接入信息并传给 DF，DF 将新的数据传输给与其相邻的节点。重复上述过程进行迭代，数据驱动模块最终可以收敛到 SC 的全局信息，并传输给管理模块，管理模块根据全局接入信息进行第二层优化。

3.2 逻辑运算迭代算法

在自律分散系统中，每个节点的接入信息可以用“0”或“1”来表示，其中“0”代表该节点 SC 退出微电网，不可投入运行；“1”代表其接入微电网，可以投入运行，因此所有节点的接入信息可以用一串二进制码来表达，其中第 p 位可代表节点 p 的接入信息。对于任意节点 p ，其管理模块向数据驱动模块发送的本节点接入信息应该为一串二进制代码，即

$$m_p = 000 \dots 0x0 \dots 000$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_p$

当节点 p 接入微电网并可投入运行时， $x=1$ ；否则 $x=0$ 。数据驱动模块同时接收与其相邻的其它

节点发出的二进制代码，并对收集到的所有二进制代码和上一次迭代结果进行按位“或”运算。如图 7 所示，若有 q 个节点与节点 p 结构上相邻^[17]，且节点 p 数据驱动模块第 $(k-1)$ 次迭代结果为 $d_p^{(k-1)}$ ，其余 q 个节点分别为 $d_{p+1}^{(k-1)}$ ， $d_{p+2}^{(k-1)}$ ， \dots ， $d_{p+q}^{(k-1)}$ ，则第 k 次的迭代结果为

$$d_p^{(k)} = \left(\bigvee_{i=p}^{p+q} d_i^{(k-1)} \right) \vee m_p \quad (13)$$

其中 $d_p^{(0)}=m_p$ ，“ \vee ”为按位“或”的运算符号，下标 p 表示下界，上标 $p+q$ 代表上界，因此符号后的元素 d_i 从 $i=p$ 开始取数，一直取到 $i=p+q$ ，然后全部进行按位或运算。设系统中的总节点数为 n ，对于系统中的任意节点 i, j ，定义 a_{ij} ，若 i, j 相邻，则 $a_{ij}=1$ ，否则 $a_{ij}=0$ ，并且恒有 $a_{ii}=a_{jj}=1$ 。由式(13)可知整个系统经过 k 次迭代之后的新值为

$$\mathbf{D}^{(k)} = \begin{bmatrix} d_1^{(k)} \\ d_2^{(k)} \\ \vdots \\ d_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\bigvee_{i=1}^n a_{1i} d_i^{(k-1)} \right) \vee m_1 \\ \left(\bigvee_{i=1}^n a_{2i} d_i^{(k-1)} \right) \vee m_2 \\ \vdots \\ \left(\bigvee_{i=1}^n a_{ni} d_i^{(k-1)} \right) \vee m_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{D}^{(0)} = \begin{bmatrix} d_1^{(0)} \\ d_2^{(0)} \\ \vdots \\ d_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

由图论可知自律分散系统中各个节点的通信线路是无向的^[18]，因此即使个别通信线路发生故障，只要系统所有节点连通，都不会影响最终收敛结果。对于系统中的任意两个节点 i, j ，设他们的最短路长为 $r_{ij\min}$ ，由于系统总结点数为 n ，因此有

$$r_{ij\min} \leq n-1 \quad (16)$$

由(16)可知，只要迭代次数大于等于 $n-1$ ，则各个节点的数据驱动模块必然可以得到全局接入信息。在进行第二层优化时，可以根据系统容量选择合适的迭代时间和迭代次数。通过迭代，每个节点的数据驱动模块可以收敛到全局节点的接入信息，并传输给管理模块。各个 SC 是否接入微电网的信息确定后，管理模块可以根据(12)得到各 SC 的下垂

系数 k_c ，再分别结合(8)、(9)调节 U_{ref} 和 u_k ，从而实现第二层优化，优化策略整体框图如图 8 所示。

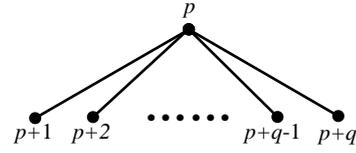


图 7 自律分散系统局部节点

Fig.7 Local node of autonomous decentralized system

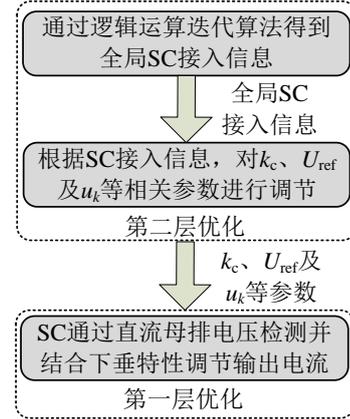


图 8 优化策略框图

Fig8 optimization strategy block diagram

4 仿真实验与实验分析

4.1 效率优化仿真实验

为了验证本文提出的优化控制方法，本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建模型，以三台并联运行的 SC 为例进行了仿真研究，其中直流母排电压为 750 V，储能电池额定电压为 380 V，SC 最大放电电流为 60 A。

孤网状态下 SC 向微电网输出的功率变化如图 9 所示。由图可知在 0.02 s 时刻，储能输出的功率由 102 kW 变为 53 kW；在 0.04 s 时刻，输出功率减小为 35 kW；在 0.06 s 时刻，输出功率进一步减小为 22 kW。图 10 为传统下垂控制下的三台 SC 输出电流，三台 SC 的输出电流波形完全相同并同时降低。对下垂特性进行优化后的三台 SC 输出电流如图 11 所示，由图可知当输出总功率为 102 kW 时，三台 SC 输出电流相同；当功率降低为 53 kW 时，第三台 SC 停止功率输出；随着功率的进一步降低，在 0.06 s 时刻第二台 SC 也停止功率输出。经过优化后，不管负荷如何变化，各 SC 或者不输出功率，或者工作在效率最高点附近从而降低换流损耗。

根据图 4 所示的效率特性曲线，可以得到优化

前后换流效率对比如图 12 所示。由图可知在负载较高的情况下，换流器效率基本相同，但是当负载较轻时，优化后换流器损耗较优化前更小，并且负载越轻，优化效果越明显。

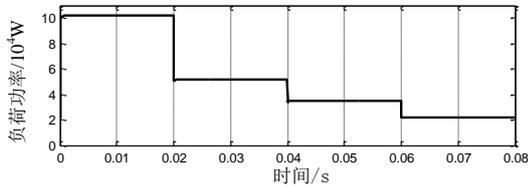


图 9 负载变化情况

Fig.9 Load change situation

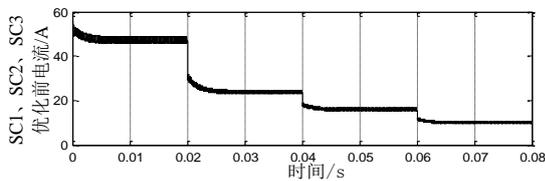


图 10 传统下垂控制下三台 SC 输出电流

Fig.10 Output current of three SCs under traditional droop control

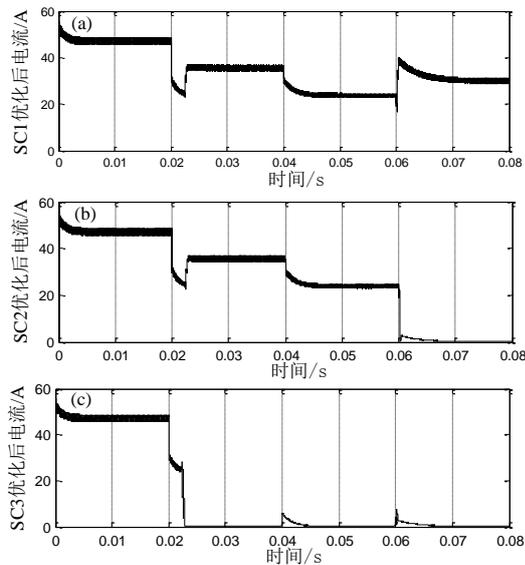


图 11 优化后的三台 SC 输出电流

Fig.11 Output current of three SCs after optimization

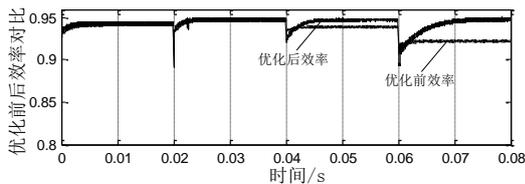


图 12 优化前后效率对比

Fig.12 Comparison between optimization and un-optimization

4.2 下垂特性调节实验分析

在多个 SC 并联运行时，各个 SC 根据直流母排电压调节下垂曲线特性，通过改变下垂曲线的参考值实现输出电流的分配与优化。为了进一步研究通过检测直流母排电压实现下垂特性自适应调节的可行性以及在下垂曲线参考值改变瞬间微网及 SC 的稳定性，搭建了基于 TI 公司高性能信号处理器 TMS320F28335 的实验平台如图 13(a)所示，其中 SC 开关频率为 12 000 Hz；实验平台主电路拓扑如图 13(b)所示。直流源可以输出有功功率，结合 SC 的下垂控制策略可以改变直流母排电压。

SC 放电状态下的下垂特性与直流母排电压关系如图 14 所示，其中曲线 1 和曲线 2 的下垂特性分别为

$$\begin{cases} I_{ref1} = -0.2U_{dc} + 126 \\ I_{ref2} = -0.2U_{dc} + 124 \end{cases} \quad (17)$$

由上式可知曲线 1 和曲线 2 的参考电压分别为 630 V 和 620 V。当直流母排电压大于 615 V 时，SC 下垂特性为曲线 1；当直流母排电压小于 615 V 时，SC 下垂曲线参考电压由 630 V 跳变为 620 V。在初始时刻令 SC 在孤网状态下运行并工作在曲线 2 下，测得直流母排电压为 610 V，总输出电流为 1.96 A，与曲线 2 吻合。母排电压波形与 SC 输出的总电流波形如图 15(a)所示，母排电压波形与 SC 内部三路电流波形如图 15(b)所示，其中三路电流波形为频率 12 000 Hz、相互交错 1/3 周期的锯齿波，如图 15(c)所示。

为了验证 SC 根据直流母排电压调节参考电压的可行性以及参考电压变化时 SC 输出电流的变化情况，在 SC 稳定放电时瞬间注入 500 W 功率进而抬高电压，此时母排电压与 SC 输出总电流的暂态波形如图 16(a)所示，母排电压与三路电流的暂态波形如图 16(b)所示。稳定后测得母排电压变为 626 V，可以测得输出总电流为 0.84 A，与曲线 1 吻合。稳定后的直流母排电压波形与 SC 输出的总电流波形如图 17(a)所示，母排电压波形与 SC 内部三路电流波形如图 17(b)所示。可见当直流母排电压改变时，SC 能够根据直流母排电压进行下垂曲线参考电压的调节，进而实现输出电流的自适应调节，并且由暂态波形可以看出，在下垂曲线参考电压发生变化时，不管是 SC 向微网侧输出的电流还是 SC 内部的电流，都没有产生较大冲击，可以实现平稳过渡，

稳定性良好。

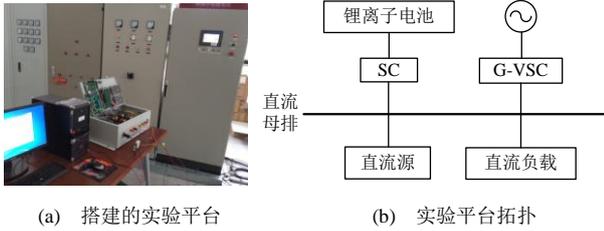


图 13 实验平台

Fig.13 Experimental platform

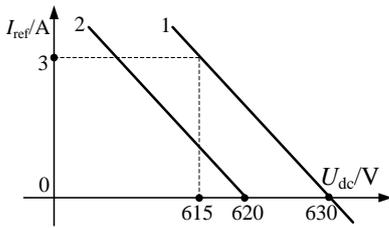


图 14 下垂特性与直流母排电压关系

Fig.14 Relationship between droop characteristic and the DC bus voltage

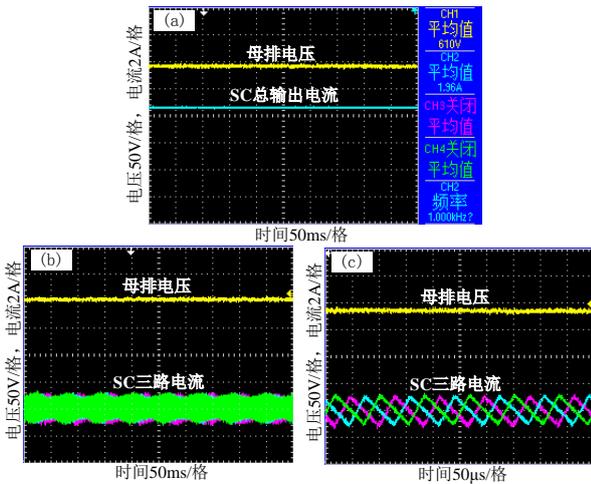


图 15 稳定状态下初始电压及电流波形

Fig.15 The initial voltage and current waveforms under steady state

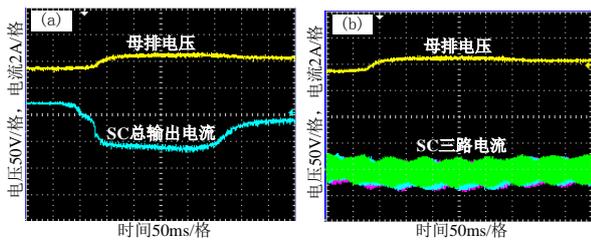


图 16 电压参考值发生变化时的电压及电流波形

Fig.16 Voltage and current waveform when voltage reference value changes

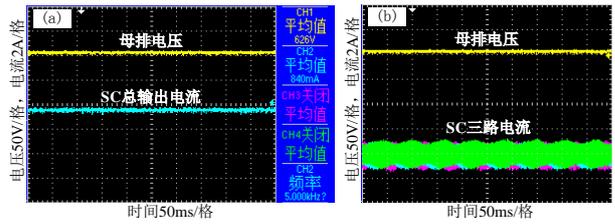


图 17 稳定后的电压及电流波形

Fig.17 Voltage and current waveforms stabilized

5 结论

本文提出了基于本地直流母排电压检测的第一层优化和基于自律分散系统的第二层优化，最终可以实现 SC 换流效率的全局优化。针对多 SC 并联运行情况下的控制系统，本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建模型，以三台并联运行的 SC 为例对效率优化情况进行了仿真研究，最后搭建了实验平台验证了下垂特性自适应调节的可行性与稳定性，得出如下结论：

1) 多 SC 并联运行不会对直流微电网稳定性造成影响，各 SC 可以构建为一个自律分散系统，结合逻辑运算迭代算法和本地电压检测，可以在直流微电网孤网运行的条件下合理调节 SC 的运行数量和输出电流，从而降低各 SC 的全局损耗，优化换流效率，并且负载越轻，优化效果越明显。

2) 当直流母排电压改变时，SC 能够根据直流母排电压值进行下垂曲线参考电压的调节，进而实现输出电流的自适应调节；在下垂曲线参考电压发生变化时，不管是 SC 的输出电流还是其内部电流，都没有产生较大冲击，可以实现平稳过渡，稳定性良好。

参考文献

- [1] Jian Z H, He Z Y, Jia J, et al. A review of control strategies for DC micro-grid[C]// 2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP). Beijing, China: IEEE, 2013: 666-671.
- [2] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19. SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An Overview of Research on Smart DC Distribution Power Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19(in Chinese).
- [3] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 直流配电系统技术分析 & 设计构想[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 82-88.

- WANG Dan , MAO Chengxiong , LU Jiming , et al. Technical Analysis and Design Concept of DC Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 82-88(in Chinese).
- [4] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12. WEN Janliang, WU Rui, Peng Chang, et al. Analysis of DC Grid Prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12(in Chinese).
- [5] Cetin E, Yilanci A, Ozturk H K, et al. A micro-DC power distribution system for a residential application energized by photovoltaic-wind/fuel cell hybrid energy systems[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(8): 1344-1352.
- [6] Cetin E, Yilanci A, Ozturk H K, et al. Construction of a fuel cell system with DC power distribution for residential applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(17): 11474-11479.
- [7] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 27-35. HAO Yuchen , WU Zaijun , DOU xiaobo , et al. Application of Multi-agent Systems to the DC Microgrid Stability Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 27-35(in Chinese).
- [8] Yuan J, Gao F, Gao H. Study on multiple hierarchical DC micro-grid based on photovoltaic generation systems[C]// 2012 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-5.
- [9] Eghtedarpour N, Farjah E. Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids[J]. Renewable Energy, 2012, 45: 96-110.
- [10] Chen D, Xu L. DC microgrid with variable generations and energy storage[C]// IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). Portland, America: IET, 2011: 1-6.
- [11] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24. WANG Yi , ZHANG Lirong , LI Heming , et al . Hierarchical Coordinated Control of Wind Turbine-based DC Microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24(in Chinese).
- [12] Bidram A , Davoudi A . Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [13] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [14] Meng L, Dragicevic T, Guerrero J M, et al. Optimization with system damping restoration for droop controlled DC-DC converters[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, America: IEEE, 2013: 65-72.
- [15] Meng L, Dragicevic T, Guerrero J M, et al. Dynamic Consensus Algorithm Based Distributed Global Efficiency Optimization of a Droop Controlled DC Microgrid[C]//IEEE International Energy Conference. Johor Bahru, Malaysia: IEEE, 2014: 1276-1283.
- [16] Klimczak P, Munk-Nielsen S. Comparative study on paralleled vs. scaled dc-dc converters in high voltage gain applications[C]//13th Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland: IEEE, 2008: 108-113.
- [17] 森欣司. 自律分散系统入门: 从系统概念到应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 18-30. SEN Xinsi. Autonomous Decentralized Systems: From System Concept to Application Technology[M]. Science Publishing House, 2008, 18-30(in Chinese).
- [18] 张清华. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013, 34-65. ZHANG Qinghua . Graph Theory and Its Applications[M]. Tsinghua University Press, 2013, 34-65(in Chinese).
- [19] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [20] Augustine S , Mishra M K , Lakshminarasamma N. Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 132-141.

收稿日期:

作者简介:

王皓界, 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流微电网, bjwanghaojie@163.com;

韩民晓, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, hanminxiao@263.net。



王皓界

Optimization Design of DC Micro-grid Stability Controller Based on the Autonomous Decentralized System

Haojie Wang¹, Minxiao Han¹, Josep M. Guerrero², Wenpeng Luan³

(1. School of Electric and Electronic Engineering; 2. Aalborg University; 3. China Electric Power Research Institute)

KEY WORDS: DC micro-grid; Stability Controller; autonomous decentralized system; droop control; efficiency optimization; logical operation iterative algorithm

DC Micro-grid Stability Controller (SC) which is connected with storage plays an important role in DC micro-grid. SC adopts two-closed-loop control strategy: the inner loop adopts current PI control and the outer loop adopts DC voltage droop control. However, the converter losses will be increased when the load is light under the condition of island operation while multi SCs are parallel operating. In order to increase the efficiency, the optimization scheme based on the autonomous decentralized system is proposed.

The relationship between the efficiency of DC/DC converter and operating current is shown in Fig.1, where μ is the efficiency. It can be seen that for every positive integer k , there exist i_{OPk} , make

$$\mu(i_{OPk}) = \mu\left(\frac{ki_{OPk}}{k+1}\right) \quad (1)$$

When SC is discharging, the variation law of voltage reference value U_{ref} is shown in Fig.2, where 1 to n are the number of discharging SC, U_N is dc voltage rating. Thus it can be obtained that

$$U_{refk} = 0.98 U_N \sum_{j=1}^k \frac{i_{OPj-1}}{jk_c} \quad (3)$$

Where i_{OP0} is charge current, k_c is droop coefficient. Thus the optimization principle can be obtained: the $k+1$ st SC begins to discharge when the DC voltage decrease to u_k and the DC voltage reference rating adjust to U_{refk+1} ; the k th SC stop discharging when the DC voltage increase to u_{k-1} and the DC voltage reference rating adjust to U_{refk-1} , where

$$u_k = U_{refk} + \frac{i_{OPk}}{k_c} \quad (4)$$

However, from Fig.2, it can be found that

$$k_c = -\frac{i_{OPn} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{i_{OPk-1}}{k}\right)}{0.03U_N} \quad (5)$$

Thus the total number of SC need to be obtained by every SC. Based on autonomous decentralized systems, every SC can obtain the total number by logical operation iterative algorithm.

With three SCs as example, the computer simulation were carried out by using MATLAB/Simulink, as show in Fig.3. The

experiment platform was build and the voltage and current transient waveform after a sudden change of DC voltage is shown in Fig.4. From the simulation and experiment, it can be found that based on optimization, every SC can self adaptively regulate its droop characteristic, and the optimization effect will be more obvious as the load decreases.

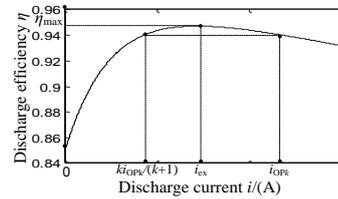


Fig.1 SC efficiency curve

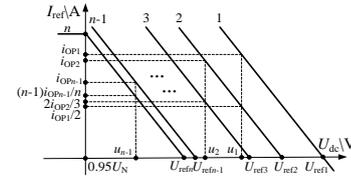


Fig.2 Voltage reference value variation

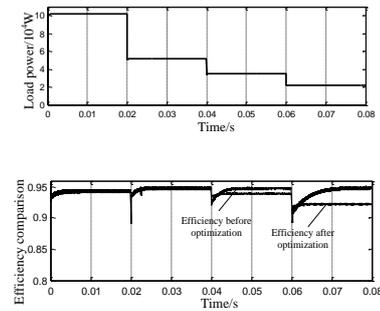


Fig.3 Comparison between optimization and un-optimization

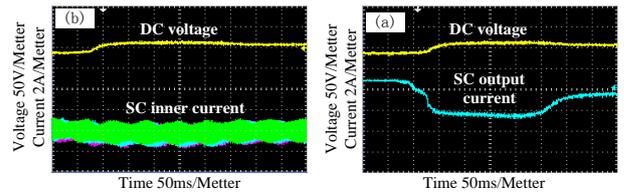


Fig.4 Voltage and current waveform when voltage reference value changes