

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210125

基于 EEMD 的 MMC 串联结构微电网微源动态冗余控制策略

王兴贵, 张文莲, 薛晟

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为提高 MMC 串联结构微电网系统的可靠性, 研究一种基于集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)的微源动态冗余控制策略。介绍了系统在非故障运行时, 通过微源原始功率 EEMD 分解、微源子模块选择、控制信号扩展与分配三个步骤实现微源动态冗余控制。系统在故障运行时, 先将故障微源子模块剔除, 再按照非故障运行状态运行。最后, 以 A 相上桥臂所有微源子模块为例, 验证了该策略不仅可以实现微源动态冗余控制, 而且能够提高微源的利用率。同时对系统有冗余和无冗余情况下, 微源子模块发生故障时的输出电压进行了仿真分析, 结果证明了所提动态冗余控制策略的可靠性和有效性。

关键词: 集合经验模态分解; 微电网; 微源; 动态冗余; 功率分解

A micro-source dynamic redundancy control strategy based on EEMD for MMC series microgrid

WANG Xinggui, ZHANG Wenlian, XUE Sheng

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To improve the reliability of an MMC series structured microgrid system, a micro-source dynamic redundancy control strategy based on Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) is studied. The system is introduced to realize micro-source dynamic redundancy control through three steps: micro-source original power EEMD decomposition, generation module selection, and control signal expansion and distribution during non-fault operation; when the system is in fault operation, the faulty generation module is removed first, and then operated according to the non-fault operation state. Finally, taking all generation modules of the upper bridge arm of phase A as an example, it is verified that the strategy can not only realize microsource dynamic redundancy control, but also can improve the utilization rate of microsourses. At the same time, the output voltage when the generation module is in the system with and without redundancy is simulated and analyzed, and the results prove the reliability and effectiveness of the proposed dynamic redundancy control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51967011).

Key words: ensemble empirical mode decomposition; microgrid; micro source; dynamic redundancy; power decomposition

0 引言

随着风电、光伏等可再生能源发电的兴起, 国内外学者提出了微电网技术, 但各种结构类型的微电网均存在一些亟待解决的问题^[1-4]。为此学者们提出了基于 H 桥微源逆变器的串联连接微电网(Series Micro Power Grids, SMPGs)^[5], 旨在从结构上解决传统微电网中存在的一些问题。在 SMPGs 的基础上, 文献[6]结合 MMC 的优点, 研究了一种 MMC 串联结构微电网系统(Modular Multilevel Converter Micro

Grid, MMC-MG), 其具有微源控制灵活、冗余性好、输出功率等级高等优点。目前, 对于 MMC-MG 系统的研究主要为其孤岛运行模式下系统输出特性分析、输出电压稳定控制^[6]、微源功率协调控制策略研究^[7-8]。当 MMC-MG 系统中部分微源子模块发生故障时, 就会导致系统的不对称运行, 造成输出电压、电流畸变, 环流增大等问题, 进而降低了系统的运行可靠性。因此, 必须要设计合理的 MMC-MG 系统微源冗余控制策略以提高系统的可靠性。

冗余控制主要分为热备用和冷备用, 热备用直接参与系统运行以实现立即冗余, 冷备用在故障发生后被激活代替故障子模块^[9-12]。为提高微源冗余

子模块的利用率, 只能以热备用的形式接入系统。但目前, 对于 MMC 冗余控制策略的研究主要集中在柔性直流输电领域。文献[13]研究了一种基于载波移相调制的 MMC 冗余保护策略, 其中冗余子模块处于旁路状态以减小额外的开关损耗, 然后通过载波动态分配来切换正常子模块和冗余子模块的运行状态, 并优先为冗余子模块充电, 以保证桥臂电容电压波动较小。文献[14]分析了含有冗余子模块的 MMC 结构与原理, 并考虑到 MMC 冗余结构的桥臂电压能量平衡, 提出了降低开关频率的优化调制策略。文献[15]为抑制子模块电容电压的波动, 研究了一种能量均衡控制及基于电容电压排序算法的冗余控制策略, 以保证冗余子模块参与系统正常运行时电容电压稳定。文献[16]基于 MMC-HVDC 系统提出了一种鲁棒故障诊断方法, 快速实现系统故障诊断, 准确完成故障识别。而本文是在假定了故障微源子模块的具体位置的基础上进行的理论研究。

由于 MMC-MG 为风电、光伏等微源构成的微电网系统, 且每个微源直流链都接有储能装置, 所以直流链电压都基本相等。同时为了提高微源的利用率, 本文将微源子模块输出功率排序与载波层叠脉宽调制相结合, 以实现微源冗余控制。但风电、光伏等微源出力具有较大的波动性^[17-18], 且能量主要分布在其低频段, 如果直接用原始功率进行排序将无法反映其真实出力大小。因此需要采用相应的信号提取算法, 提取微源功率低频分量作为微源子模块冗余控制的参考。文献[19]研究了一种基于小波包分解的光伏功率波动抑制策略, 能有效地将光伏功率分解为平抑目标功率和充放电功率, 不仅减小了输出功率的波动性, 而且提高了微源的利用率。文献[20]研究了一种基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法, 能够有效避免经验模态分解模态混叠及小波变换基函数固定等问题, 且在噪声背景下提高了谐波的检测精度。文献[21]研究了一种基于经验小波变换的微电网保护策略, 能够有效地提取零序电流最高频分量作为其故障特征分量, 提高了微电网的保护性能。文献[22]采用 EEMD 分解光伏功率信号, 其中高频分量接入储能系统以平滑光伏出力波动, 且平滑效果较好。

本文针对 MMC-MG 系统含有冗余微源子模块的结构, 提出了一种基于 EEMD 分解的微源动态冗余控制策略。即不设置固定的微源冗余子模块, 而是先对每个微源子模块原始输出功率用 EEMD 算法进行分解预处理, 提取其低频分量并排序; 根据系统桥臂电流方向以及微源子模块功率排序结果选

择相应的子模块投入运行, 剩余的为冗余微源子模块; 依据所选的微源子模块将控制信号扩展并分配给桥臂所有子模块。

1 MMC-MG 结构及调制策略

1.1 MMC-MG 结构及分析

MMC-MG 系统拓扑结构如图 1 所示。系统由发电模块(Generation Module, GM)即微源子模块按照 MMC 拓扑结构连接, 然后经过滤波器、交流母线、交流负载群、静态开关等连接至外电网。该系统含有上、下两个桥臂, 每个桥臂由 N 个正常 GM 和 K 个冗余 GM 串联一个电抗器 L 构成, 三相共含有 $6(N+K)$ 个 GM。

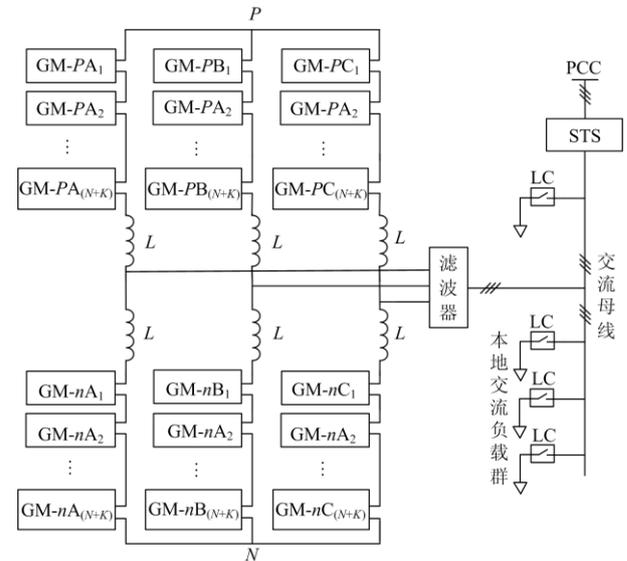


图 1 MMC-MG 拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of the MMC-MG

本系统的微源子模块(GM)拓扑结构如图 2 所示。每个 GM 由风电、光伏等微源经过整流或直流变换后连接储能装置 ES 以及半桥变流器(HC)构成; HC 由一个电容器、两个带反并联二极管的 IGBT 及一个旁路开关 S 组成。通过控制 V_1 、 V_2 的通断可以让 GM 在投入、切除两种工作模式下切换。当 GM 出现故障时, 旁路开关 S 闭合, 将故障 GM 从系统中切除。设 HC 开关函数为 s_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N + K$), $s_i \in (0, 1)$, 则每个 GM 输出电压可表示为

$$u_{xy} = s_i u_i = \begin{cases} u_i, & V_1 = 1(\text{开通}) \text{ and } V_2 = 0(\text{关断}) \\ 0, & V_1 = 0(\text{关断}) \text{ and } V_2 = 1(\text{开通}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{xy} ($x = p, n$; $y = A, B, C$; $i = 1 \sim N + K$) 为 GM 输出电压; u_i 为 GM 直流链电压。

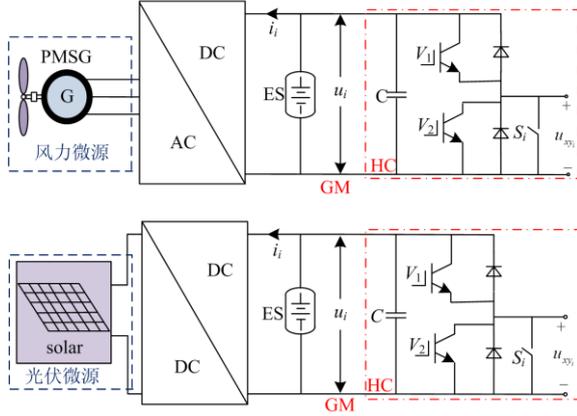


图 2 GM 拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of the GM

系统桥臂电压由每个桥臂投入运行的 GM 输出电压叠加而成，每个周期各相均投入 N 个 GM。其中， V_{PN} 为虚拟直流母线电压； u_{xA} 为桥臂电压； i_{LA} 为系统每相的环流； i_i 为流过每个微源的电流。以系统 A 相为例， V_{PN} 可以表示为

$$V_{PN} = u_{pA} + u_{nA} \quad (2)$$

系统 A 相上、下桥臂输出电压为

$$u_{xA} = \sum_{i=1}^N s_i u_i \quad (3)$$

系统 A 相电流为

$$i_{pA} = i_{LA} + \frac{i_A}{2} \quad (4)$$

$$i_{nA} = i_{LA} - \frac{i_A}{2} \quad (5)$$

以系统功率输入为正方向，则每个微源原始输入功率为

$$P_i = u_i \cdot i_i \quad (6)$$

1.2 调制策略

载波层叠脉宽调制(Phase Disposition PWM, PD-PWM)是一种输入与输出之间为线性关系的调制方式，具有良好的谐波特性且易于实现冗余控制^[23-24]。其具体控制原理为：不考虑冗余时，每个桥臂 GM 数量为 N ，则需要 N 个载波，正负半周各分配 $N' = N/2$ 个载波。当调制波大于三角载波，则输出“1”信号；调制波小于三角载波，则输出“0”信号，如图 3 所示^[25]。

设系统上、下桥臂调制电压为

$$u_{\text{ref}_p} = \frac{V_{PN}}{2} (1 - M \cos \omega t) \quad (7)$$

$$u_{\text{ref}_n} = \frac{V_{PN}}{2} (1 + M \cos \omega t) \quad (8)$$

式中， $M \in (0,1)$ 为调制比。

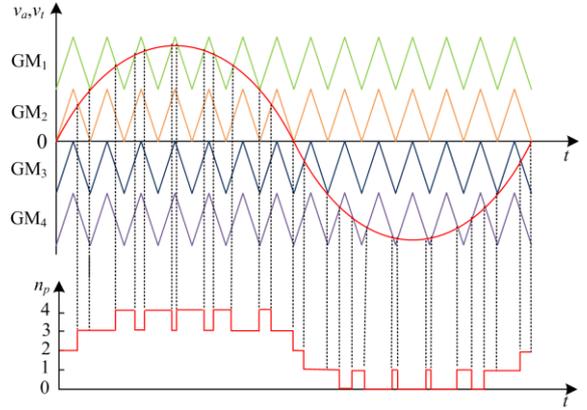


图 3 PD-PWM 调制原理

Fig. 3 Modulation principle of PD-PWM

2 微源动态冗余控制策略

系统正常运行时，每个 GM 均能参与运行，即为动态冗余。GM 无故障，旁路开关 S 断开，GM 的投切由 PD-PWM 调制产生的控制信号控制；GM 有故障，旁路开关 S 闭合，功率开关 V_1 、 V_2 赋值为 $(0,0)$ ，GM 被切除，系统继续保持可靠运行。

为提高风电、光伏等随机性微源的利用率和实现冗余控制，需要对每个桥臂微源输出功率进行排序，选择功率较大的微源子模块投入运行，剩余的为冗余微源子模块。但风电和光伏出力具有较大的波动性，且能量主要集中在 $0 \sim 10^{-4} \text{ Hz}$ ^[26]。若直接采用原始功率进行排序，则可能原始功率较大的其实际功率不一定大，造成资源不能高效利用。

据此，本文研究一种基于 EEMD 分解的微源动态冗余控制策略。该策略的主要思想为：设 $N+1$ 电平的 MMC-MG 系统每个桥臂 GM 总数为 $J=N+M$ ， Z 为故障子模块个数；首先，对风电、光伏等微源的原始功率进行 EEMD 分解，提取其低频分量并排序；然后根据 PD-PWM 调制原理，一个工频周期 $\Delta T = 1/f$ ，其中 $f = 50 \text{ Hz}$ ，则 $\Delta T = 0.02 \text{ s}$ ；即每隔 0.02 s ，若桥臂电流大于零，则选择 n 个功率较大的 GM 处于运行状态，若桥臂电流小于零，则选择 n 个功率较小的 GM 处于运行状态；给选择的 n 个处于运行状态的 GM 控制信号赋 $(1, 0)$ 值，其他的 GM 控制信号赋 $(0, 1)$ 值，使其处于动态冗余状态。在用 EEMD 分解算法提取微源原始功率低频分量时，分解得到的模态必须能在 0.02 s 分辨出其大小，以便微源功率排序选择需要投入的 GM。GM 动态冗余控制框图如图 4 所示。

由图 4 可知，该控制策略主要分为 4 个步骤：故障 GM 预处理、微源原始功率 EEMD 分解、GM 选择、控制信号扩展与分配。首先，判断桥臂中是否

含有故障 GM, 无故障 GM($Z=0$)时, 对微源原始输出功率进行 EEMD 分解并排序; 然后进入 GM 选择逻辑, 由桥臂电流及调制策略选择 n 个 GM 投入运行, 若系统中存在故障子模块($Z \neq 0$), 则先进行故障子模块预处理后再对剩余微源进行原始功率分解; 最后根据所选择的 GM 对其控制信号进行扩展并分配给 MMC-MG 系统的每个子模块。

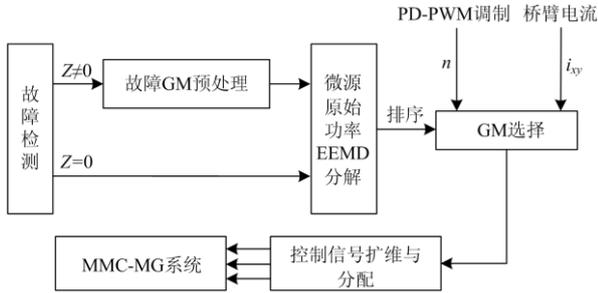


图 4 GM 动态冗余控制框图

Fig. 4 Dynamic redundancy control block diagram of GM

2.1 微源原始功率 EEMD 分解

EEMD 是对经验模态(EMD)分解算法的改进^[27], 是一种适用于处理非线性非平稳信号的自适应时序分解方法, 能将每个微源原始功率信号分解为多个模态(IMF)和残余分量。其中, 每个模态须满足两个必要条件: (1) 单位时间段内, 一阶导数为零的点和过零点的数目为 0 个或者 1 个; (2) 任意时刻, 所有极值点形成的上、下包络线必须关于时间轴对称。EEMD 具体分解步骤如下^[28-29]。

1) 计算原始信号中一阶导数为零的点, 并求出其上、下包络线 $e_u(t)$ 和 $e_l(t)$ 的平均值 $m_1(t)$ 为

$$m_1(t) = \frac{e_u(t) + e_l(t)}{2} \quad (9)$$

2) 设变量 $h_1(t)$, 令其为

$$h_1(t) = h(t) + k_1 v_0(t) - m_1(t) \quad (10)$$

式中: $h(t)$ 表示微源原始功率信号; $v_0(t)$ 表示白噪声信号。不断重复上述两个步骤, 当达到 IMF 的两个必要条件, 则分解得到第一个 IMF, 表示为 $c_1(t)$, 否则, 记为原始信号。

3) 计算剩余信号 $r_1(t)$

$$r_1(t) = h(t) - c_1(t) \quad (11)$$

在剩余信号中加入新的白噪声, 重复上述步骤, 直到残余分量小于某一个预定常数时, 所有 IMF 被提取出来, 也即分解完毕。EEMD 分解先得到的是高频分量, 然后是次高频分量, 最后为低频分量以及残余分量, 前后两次分解的 IMF 趋势不同时, 则为低频和低频信号的分界点。

以一个风力、光伏微源为例, 仿真得到其原始

输出功率信号如图 5 所示。然后对其输出功率进行 EEMD 分解, 且直到分解出来的低频信号在一个工频周期 0.02 s 内可以进行功率大小排序即可, 则各微源原始输出功率 EEMD 分解得到的各阶 IMF 曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 分解到 IMF5 时信号趋势发生变化, 则将 IMF1—IMF4 作为高频信号直接接入储能, IMF5 和 IMF6 在每个工频周期(0.02 s)内无法判别两

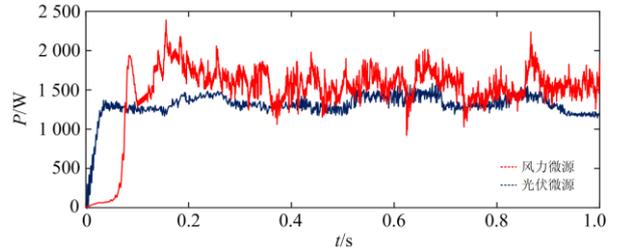
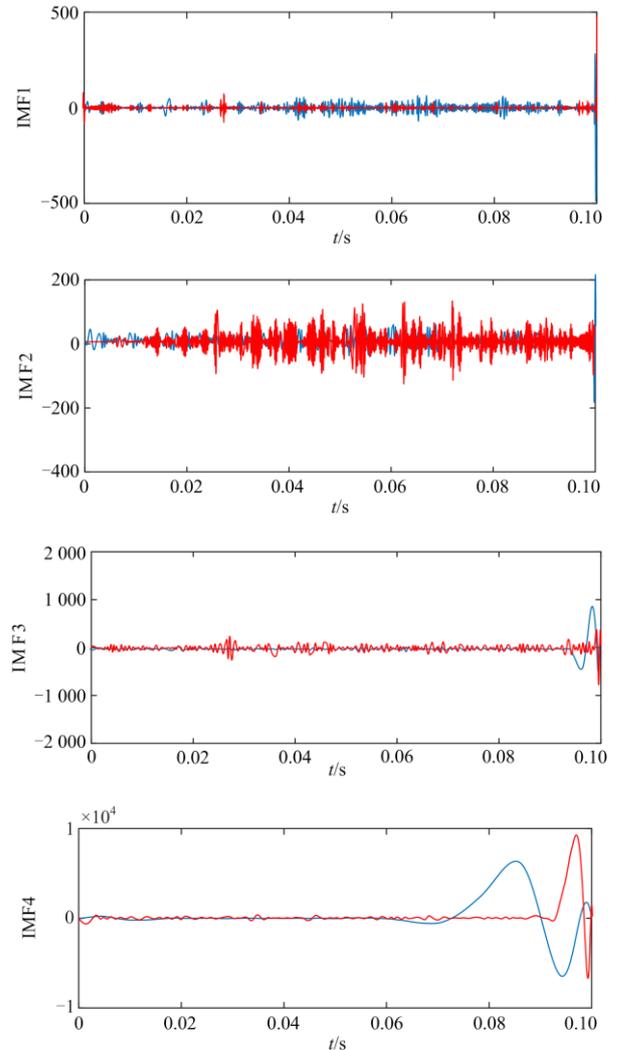


图 5 风力、光伏微源原始功率信号曲线

Fig. 5 Curves of micro source original power signal



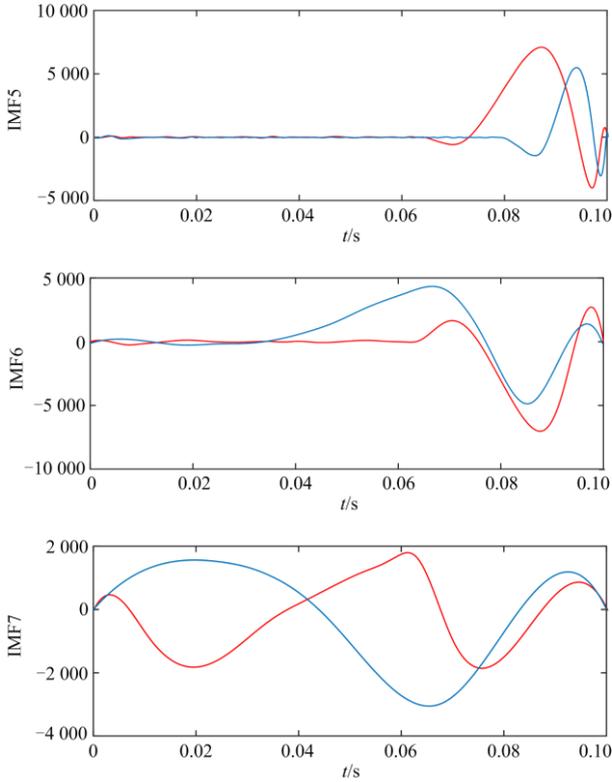


图 6 微源原始信号 EEMD 分解曲线

Fig. 6 EEMD decomposition curves of micro source original signal

个微源子模块功率的大小，因此以 IMF7 的信号曲线进行功率大小排序。

2.2 GM 选择

微源输出功率经过信号分解预处理和从大到小排序后，若无故障 GM，则直接进入 GM 选择逻辑。以 A 相上桥臂为例，各 GM 输出功率如图 7 所示。

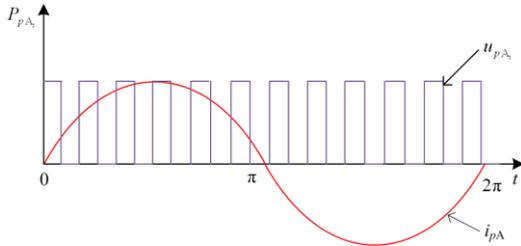


图 7 GM 输出功率波形

Fig. 7 Waveform of output power

由图 7 可得，各 GM 输出功率可表示为

$$P_{pA_i} = \int_0^{\pi} u_{pA_i} i_{pA} dt + \int_{\pi}^{2\pi} u_{pA_i} i_{pA} dt \quad (12)$$

在区间 $[0, \pi]$ ，桥臂电流 i_{pA} 大于零，则其输出功率大于零；在区间 $[\pi, 2\pi]$ ，桥臂电流 i_{pA} 小于零，则输出功率小于零；为提高微源利用率需使其总输

出功率最大。即桥臂电流大于零时，选择输出功率较大的 GM 处于运行状态；桥臂电流小于零时，选择输出功率较小的 GM 处于运行状态。

GM 选择规则：如图 8 所示，其中 ΔT 为一个工频周期 0.02 s， T 为累计时间， t 为运行时刻； $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{J-Z}\}$ 为投入运行的 GM 集合， $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{J-Z}\}$ 为运行状态 GM 集合。当 t 不等于 T 时，则不需要进行 GM 选择，直接按照上一时刻选择的 GM 继续运行；当 t 等于 T 时，则需要重新选择处于运行状态的 GM。

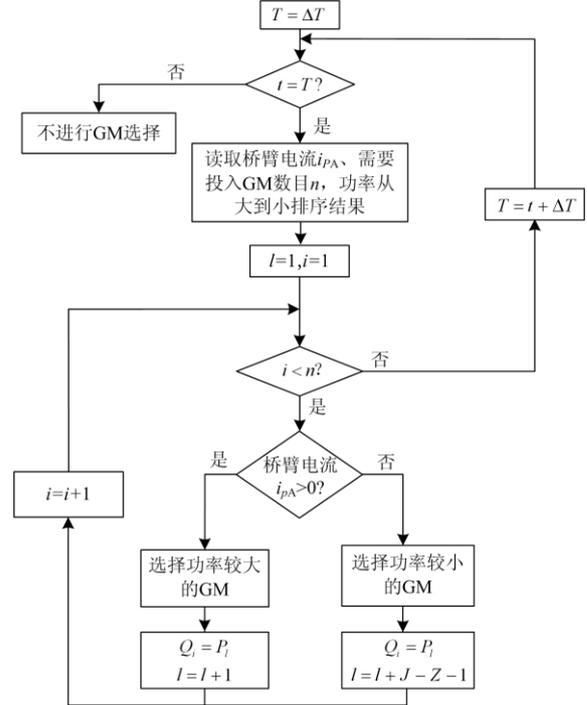


图 8 GM 选择逻辑

Fig. 8 GM selection logic

读取桥臂电流和该时刻需要投入运行的子模块个数 n ，结合 GM 功率排序结果。当 i 小于 n 时，运行状态 GM 未选择结束，即进入 GM 选择环节。桥臂电流大于零时，选择功率较大的 GM 处于运行状态，令 $Q_i = P_j$ ， $l = l + 1$ ；桥臂电流小于零时，选择功率较小的 GM 处于运行状态，即 $Q_i = P_j$ ， $l = l + J - Z - 1$ 。令 $i = i + 1$ ，继续判断 i 是否小于 n 。

当 i 大于等于 n 时，GM 选择结束，令 $T = t + \Delta T$ ，继续判断 t 是否等于 T 。

2.3 故障 GM 预处理

系统中有 GM 发生故障时，先将故障 GM 从系统中剔除，再进行 GM 选择。如图 9 所示， i 为故障前投入运行的 GM 序号， j 为去除故障 GM 后的序号， k 为故障 GM 的序号， $P_j = \{P_{j,1}, P_{j,2}, \dots, P_{j,J-Z}\}$ 为去除故障 GM 后的集合。

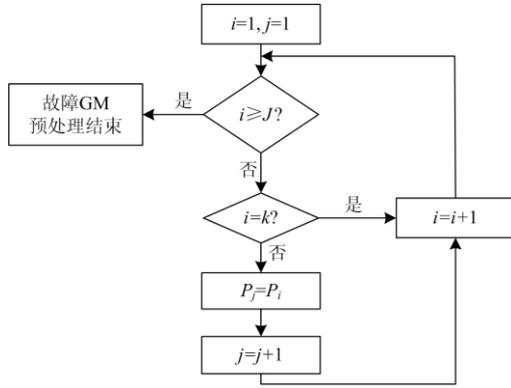


图9 故障 GM 预处理

Fig. 9 Fault GM pretreatment

故障 GM 预处理逻辑为：当 GM 发生故障时，从第一个 GM 开始判断，令 $i=1, j=1$ 。如果 i 大于等于总子模块数 J ，则故障 GM 预处理结束，开始进入 GM 选择逻辑；否则，判断是否为故障 GM。若 $i=k$ ，则是故障 GM，应跳过该故障 GM 直接令 $i=i+1$ ，重新进行循环判断；若 i 不等于 k ，GM 不是故障子模块，则令 $P_i=P, j=j+1, i=i+1$ ，再次重新进行循环判断；直到 i 大于等于总子模块数 J ，跳出循环，故障 GM 处理结束。

2.4 控制信号扩展与分配

GM 选择结束后进入控制信号扩展与分配环节。具体原则为：当桥臂中无故障 GM ($Z=0$) 时，则得到的控制信号为 N 组，再将其扩展到 J 组，使得冗余 GM 也投入运行；即给 2.2 节中选择的 GM 控制信号赋 (1,0) 值，剩余的为冗余 GM，控制信号赋 (0,1) 值。当系统桥臂中有故障 GM ($Z \neq 0$) 时，则系统 GM 数目为 $J-Z$ 个，产生 $J-Z$ 组的控制信号，为了让控制信号与桥臂中的所有 GM 一一对应，需要将 $J-Z$ 组控制信号扩展为 J 组；即直接令故障 GM 控制信号为 (0,0) 值，再将 $J-Z$ 组控制信号扩展为 J 组，最后将控制信号分配给桥臂中所有的 GM。

在实际应用中，首先通过传感器采集系统的控制信号，然后通过微处理器计算得到每个桥臂可调节的 GM 个数和调节时间。定义系统可调节裕度极限为

$$\begin{cases} Z_{A_max} \leq M \\ Z_{A_min} \geq 0 \\ Z_{A_min} \leq Z \leq Z_{A_max} \end{cases} \quad (13)$$

式中： Z_{A_max} 为 GM 最多故障个数； Z_{A_min} 为 GM 最少故障个数。根据 2.2 节 GM 选择逻辑选择每个工频周期功率最大的 GM 投入运行，最后再按照 2.4 节将控制信号扩展并分配给每个 GM。

3 仿真分析

为验证本文所提动态冗余控制策略的可行性和有效性，按照图 1 和图 2 所示的拓扑结构搭建系统仿真模型，其中仿真参数如表 1 所示。

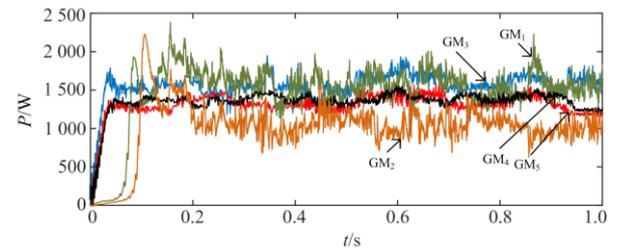
表 1 MMC-MG 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters of MMC-MG

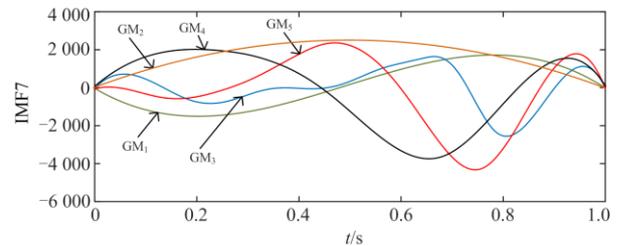
参数	数值
载波频率/kHz	10
电容/ μF	4 400
桥臂电感/mH	1
滤波电容/ μF	16
滤波电感/mH	0.5
三相星型负载/ Ω	30
调制比	0.9

设定微源的光照强度、温度及风速随时间而变化，以系统 A 相上桥臂 5 个 GM 为例，其中 4 个为正常 GM，1 个为冗余 GM，各微源原始功率信号如图 10(a) 所示。图中， GM_1 和 GM_2 为风力微源，其输出功率随环境条件的变化发生较大的波动； GM_3 、 GM_4 、 GM_5 为光伏微源，其输出功率随环境条件的变化波动较小。

上述微源的原始输出功率经 EEMD 分解处理后，取其低频分量的 IMF7 进行功率大小排序，IMF7 的波形如图 10(b) 所示。假设 A 相上桥臂投入 4 个，下桥臂投入 0 个，则在工频周期 0.02~0.04 s 内选择 GM_4 、 GM_2 、 GM_5 、 GM_3 为处于运行状态的 GM， GM_1 为本周期冗余 GM；在工频周期 0.04~0.06 s，选择 GM_2 、 GM_5 、 GM_4 、 GM_3 为处于运行状态的



(a) 微源原始功率信号



(b) 微源原始功率 EEMD 分解

图 10 微源原始功率输出波形

Fig. 10 Micro source original power output waveform

GM, GM₁ 为本周期冗余 GM; 在工频周期 0.06~0.08 s 内选择 GM₂、GM₃、GM₁、GM₅ 为处于运行状态的 GM, GM₄ 为本周期冗余 GM。验证了该策略不仅可以实现微源动态冗余而且提高了微源的利用率。

在光照强度、温度及额定风速等条件一定时, 系统微源直流链电压稳定在 160 V。当桥臂不配置冗余 GM, 仿真波形如图 11 所示。其中图 11(a)、图 11(b)分别为系统三相线电压输出波形及频谱分析; 由图 11 可知, 系统稳定运行时, 三相线电压保持稳定且对称, 线电压谐波畸变率为 0.35%, 畸变率较小。

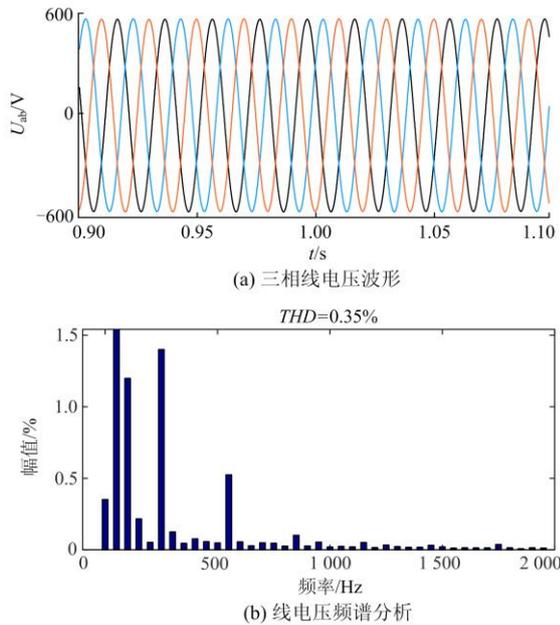
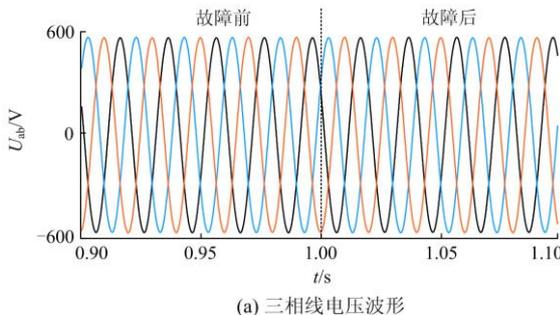


图 11 系统无冗余时的仿真波形

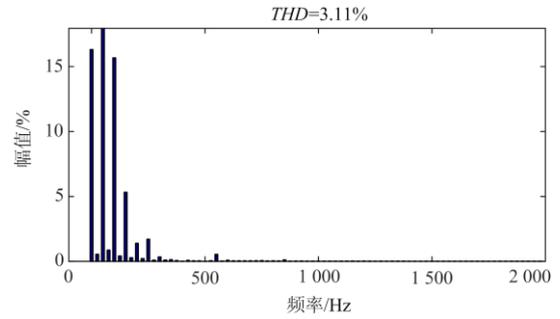
Fig. 11 Simulation waveform when the system has no redundancy

在系统运行到 1 s 时, A 相上桥臂一个 GM 发生故障的三相输出电压、频谱分析仿真波形如图 12 所示。由图 12 可知, 三相线电压波形不再对称, 不对称度为 12.94%, 谐波畸变率增大到 3.11%。

采用本文所提动态冗余控制策略, 当 A 相上桥臂有一个 GM 故障时, 仿真结果如图 13 所示。由图 13 可知, 三相线电压在 1 s 时继续保持对称运行,



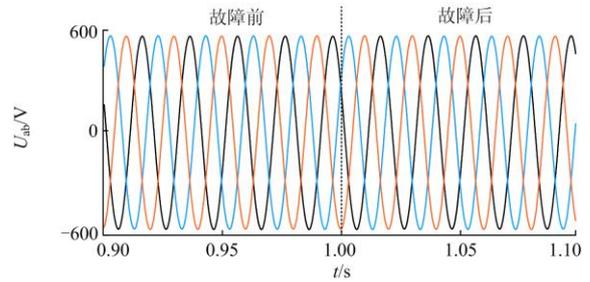
(a) 三相线电压波形



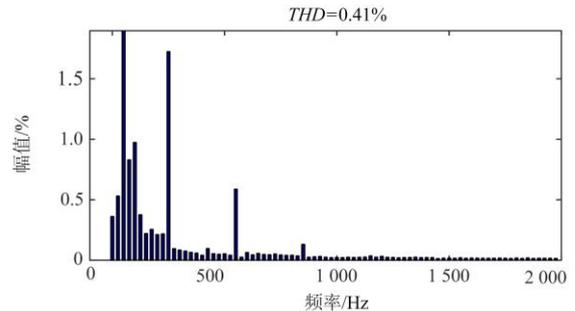
(b) 三相线电压频谱分析

图 12 系统无冗余故障时的仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform when the system has no redundant fault



(a) 三相线电压波形



(b) 三线电压频谱分析

图 13 微源动态冗余控制仿真结果

Fig. 13 Simulation results of micro source dynamic redundant control

畸变率降低为 0.41%。验证了本文所提动态冗余控制策略能够提高系统的可靠性。

4 结论

本文针对 MMC-MG 系统含有冗余微源子模块的情况, 提出了一种适用于该系统的微源动态冗余控制策略。在系统非故障运行时, 采用微源原始功率分解预处理、GM 选择、控制信号扩展与分配三个步骤, 既实现了微源动态冗余控制, 又让微源“能者多劳”大大提高了微源的利用率; 在系统故障时, 先将故障 GM 剔除再根据非故障运行状态运行。仿

真结果表明, 相比不设置冗余 GM, 该策略能在系统 GM 故障时, 仍然保持正常运行, 减小了输出电压的畸变率和不对称度, 提高了系统的可靠性。但冗余子模块耗尽后, 桥臂剩余 GM 不能够提供足够的桥臂电压, 使得上、下桥臂不再对称, 最终导致三相交流输出电压、电流发生畸变、环流增大等问题。因此, 后续将针对冗余 GM 耗尽时的控制策略进行研究。

参考文献

- [1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [2] MOLINA M G, MERCADO P E. Power flow stabilization and control of microgrid with wind generation by superconducting magnetic energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(3): 910-922.
- [3] 杨茂, 王金鑫. 需求侧管理参与的孤岛型微电网多目标优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 1-11.
YANG Mao, WANG Jinxin. Multi-objective optimization scheduling of islanded microgrid participated by demand management[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 1-11.
- [4] CHANG Y C, LIAW C M. Establishment of a switched-reluctance generator-based common DC microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(9): 2512-2527.
- [5] 王兴贵, 杨维满. 一种微源逆变器串联连接型微网特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 129-135.
WANG Xinggui, YANG Weiman. Study on characteristics of a microgrid with micro source inverters connected in series[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 129-135.
- [6] 王兴贵, 薛晟, 李晓英. 模块化多电平变流器半桥串联结构微电网输出特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2130-2140.
WANG Xinggui, XUE Sheng, LI Xiaoying. Analysis of output characteristics of a microgrid based on MMC half-bridge series structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2130-2140.
- [7] 薛晟, 王兴贵, 李晓英. 基于变分模态分解法的 MMC 半桥串联结构微电网微源功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1677-1687.
XUE Sheng, WANG Xinggui, LI Xiaoying. Microsource power coordination control of MMC-MG via variational mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1677-1687.
- [8] 舒恺, 刘峰, 郭高鹏, 等. 并网型直流微电网协调控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 58-67.
SHU Kai, LIU Feng, GUO Gaopeng, et al. The coordinated control strategy for grid-connected DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 58-67.
- [9] MA M, HU L, CHEN A, et al. Reconfiguration of carrier-based modulation strategy for fault tolerant multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 2050-2060.
- [10] LI B, ZHANG Y, YANG R, et al. Seamless transition control for modular multilevel converters when inserting a cold-reserve redundant submodule[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8): 4052-4057.
- [11] SON G T, LEE H J, NAM T S, et al. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1611-1619.
- [12] HAMMOND P W. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 948-954.
- [13] 林周宏, 刘崇茹, 林雪华, 等. 基于载波移相调制的模块化多电平换流器冗余保护策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 109-115.
LIN Zhouhong, LIU Chongru, LIN Xuehua, et al. Redundant protection strategy based on CPS SPWM for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 109-115.
- [14] KONSTANTINOU G, POU J, CEBALLOS S, et al. Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2333-2341.
- [15] 罗婉韵, 黄守道, 胡敬伟, 等. 模块化多电平换流器冗余运行控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(6): 7-11.
LUO Wanyun, HUANG Shoudao, HU Jingwei, et al. Research on redundant operation control strategy of modular multilevel converter[J]. Power Electronics, 2015, 49(6): 7-11.
- [16] YAO Z, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [17] 陈波, 吴政球. 基于约束因子限幅控制的双馈感应发电机有功功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 130-137.
CHEN Bo, WU Zhengqiu. Power smoothing control

- strategy of doubly-fed induction generator based on constraint factor extent-limit control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 130-137.
- [18] 赵成斌, 林湘宁, 汪致洵, 等. 计及岛群辐射半径与能量波动性的远洋海岛群分割组合多目标优化策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 85-91.
ZHAO Chengbin, LIN Xiangning, WANG Zhixun, et al. Multi-objective optimizing strategy of pelagic clustering islands considering cluster radius and power balance[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 85-91.
- [19] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317-324.
WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317-324.
- [20] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [21] 高杰, 谷雨, 潘希希, 等. 基于经验小波变换和高频分量的微电网保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 50-56.
GAO Jie, GU Yu, PAN Yixi, et al. A microgrid protection method based on an empirical wavelet transform and a high frequency component[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 50-56.
- [22] 杨锡运, 曹超, 任杰, 等. 利用储能系统平滑光伏波动的模糊聚类经验模态分解方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2127-2133.
YANG Xiyun, CAO Chao, REN Jie, et al. Control method of smoothing PV power output with battery energy storage system based on fuzzy ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2127-2133.
- [23] MCGRATH B P, HOLMES D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [24] 武晓堃, 王奎, 万磊, 等. 模块化多电平变换器三种调制策略及电压平衡控制仿真与对比研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(12): 4-9.
WU Xiaokun, WANG Kui, WAN Lei, et al. Simulation and comparative study of three modulation strategies and voltage balance control in modular multilevel converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(12): 4-9.
- [25] ADAM G P, ANAYA-LARA O, BURT G M, et al. Modular multilevel inverter: Pulse width modulation and capacitor balancing technique[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(5): 702-715.
- [26] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8-13, 24.
HAN Xiaojuan, CHEN Yueyan, ZHANG Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13, 24.
- [27] 刘强, 胡志强, 周宇, 等. 基于 CEEMD 和随机森林算法的短期风电功率预测[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 71-76, 94.
LIU Qiang, HU Zhiqiang, ZHOU Yu, et al. Short-term wind power forecasting based on CEEMD and random forest algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 71-76, 94.
- [28] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [29] 杨磊, 黄元生, 张向荣, 等. 基于集合经验模态分解和套索算法的短期风速组合变权预测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 81-90.
YANG Lei, HUANG Yuansheng, ZHANG Xiangrong, et al. Research on short-term wind speed hybrid variable weight prediction model based on ensemble empirical mode decomposition and LASSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 81-90.

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-03-17

作者简介:

王兴贵(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电系统与控制, 微电网技术, 电力电子与电力传动; E-mail: Wangxg8201@163.com

张文莲(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力变换及其控制。E-mail: vvxiaokaola@163.com

(编辑 周金梅)