

混合微电网与配电网间的串联环节及其控制

孟润泉¹, 魏 明¹, 高 晗¹, 王 磊¹, 韩肖清¹, 李胜文²

(1. 电力系统运行与控制山西省重点实验室(太原理工大学), 太原 030024; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001)

摘 要: 为了提高交直流混合微电网并网运行时对配电网故障的穿越能力和电能质量, 提出在配电网和交直流混合微电网之间加入串联环节, 该串联环节可与微网中交直流子网间的 AC/DC 双向功率变换器配合提高交流子网的电能质量, 同时可抑制配电网和交直流混合微电网之间的故障电流。首先介绍该串联环节的基本结构和运行模式。然后, 基于在 abc 三相静止坐标系和 dq 两相同步旋转坐标系下的数学模型, 设计一种配电网电压前馈、负载电压和补偿电压双反馈的电压补偿控制策略, 并采用电压电流双闭环控制方法进行故障电流抑制。此外, 对该串联环节的变压器进行设计。最后, 通过仿真验证上述串联环节及其控制策略的有效性。

关键词: 故障电流抑制; 配电网; 电能质量; 微电网; 串联补偿环节

中图分类号: TM7

文献标志码: A

0 引 言

交直流混合微电网(hybrid micro-grid, HMG)通常有并网模式和孤岛模式2种运行模式。当运行于孤岛模式时, HMG便成为一个自给自足的独立系统。然而, 在并网模式下, 交直流 HMG 与配电网直接相连, 配电网为交直流 HMG 的交流母线提供电压支撑。HMG 的微电源发出的功率多于负荷的功率需求时, HMG 将过剩功率传输给配电网; 反之, 配电网向 HMG 传输一部分功率^[1-4]。显然, 在并网模式下, HMG 会受到配电网的影响。当配电网侧电压跌落、骤升或不平衡变化时, HMG 的交流母线电压也会发生相应的变化, 必然会影响到交流母线所挂敏感负载的正常运行, 并威胁到电力电子器件的安全。可见, 对提高交直流 HMG 和配电网间故障穿越能力的研究具有重要的现实意义^[5]。

关于提高微电网故障穿越能力的研究已有很多。文献[6]提出一种基于前馈和反馈控制相结合的动态电压恢复器, 以提高风力双馈异步发电机的故障穿越能力, 但其仅考虑了风力双馈异步发电机的故障穿越能力, 并未考虑整个微电网的故障穿越能力。文献[7]对比分析了超导故障限流器和动态电压恢复器对高渗透率微电网故障穿越能力提高的效果, 但其仅仅考虑了电压发生平衡变化时的情况, 并未考虑不平衡电压

对微电网故障穿越能力的影响。文献[8]提出一种提高 HMG 交流侧电压不平衡的故障穿越能力的控制策略, 保证了交流侧三相电流正弦对称、直流母线电压波动较小, 但并未恢复交流母线电压至故障前水平, 无法保证交流母线所挂敏感负载正常运行。文献[9-10]均提出一种微电网并网接口电能质量补偿装置, 但未分析微电网与配电网相互影响的作用机理和暂态性能, 且该电能质量补偿装置仅适用于微电网中每个独立的分布式电源系统。

为提高交直流 HMG 对配电网电压跌落或骤升的故障穿越能力同时提高交流母线的供电质量, 本文提出在配电网和交直流 HMG 的交流母线之间加入一种串联环节。当配网侧电压发生变化时, 其可调节交直流 HMG 交流子网的电压在正常水平, 以保证交流母线所挂敏感负载正常运行; 当配网侧电压波动较大甚至发生短路故障时, 其可抑制交直流 HMG 和配电网之间的故障大电流, 用于化解大电流对交直流母线接口变换器的冲击, 确保接口功率电路中电力电子器件的安全。

1 串联环节的拓扑

图1所示为含串联环节的交直流 HMG 的架构图。串联环节的直流侧接于交直流 HMG 直流母线上, 因此直流母线可用来缓冲需求的能量; 交流侧通过串联

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 山西省自然科学基金(201701D121134); 国家自然科学基金(U1610121); 高端外国专家项目(GDW20181400422)

通信作者: 孟润泉(1968—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事电力电子技术及其在电力系统中的应用研究。
mengrunquan@126.com

补偿变压器串联在配电网和 HMG 交流母线之间。主电压源型变流器(master voltage source converter, VSC_M)将此 HMG 的交流子网和直流子网连接起来。HMG 的交流子网的电压等级为 380 V, 直流子网的电压等级为 750 V。

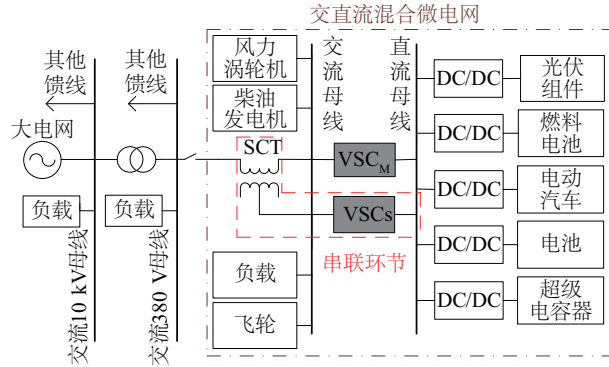


图1 含串联环节的交直流混合微电网的架构图

Fig. 1 Architecture of AC-DC HMG with series link

另外, 直流子网包括分布式直流电源(如光伏组件、燃料电池等)、直流负荷(如直交流空调、电动汽车等)和储能装置(如电池、超级电容器等)。类似地, 交流子网由分布式交流电源(如风力涡轮机、柴油发电机)、交流负荷(如交流电动机)和交流储能装置(如飞轮等)组成。

串联环节的具体拓扑结构如图2所示。串联环节的主回路包括直流母线、从电压源型变流器(slave voltage source converter, VSC_S)、LC低通滤波器和串联补偿变压器(series compensation transformer, SCT)。控制 VSC_S 输出合适的电压到 SCT 上, 以达到串联补偿或者限制电流的目的, 提高 HMG 的故障穿越能力, 保证其安全可靠运行。图中 R_l 和 L_l 分别表示 HMG 和配电网之间线路的等效电阻和电抗, 低通滤波器由 3 个滤波电容 C_f 和 3 个滤波电感 L_f 组成(R 为电感内阻), 用来滤除 VSC_S 输出的高频成分。此外, SCT 的二次侧采用星型联结。

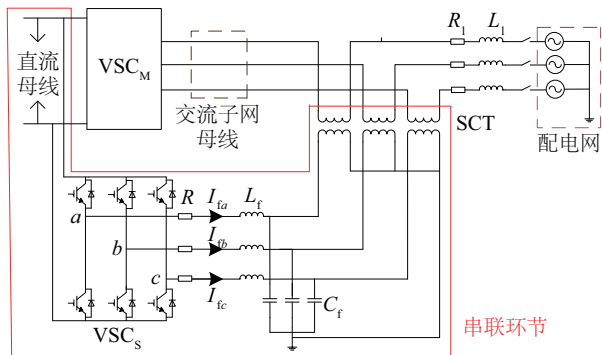


图2 串联环节的电路结构

Fig. 2 Circuit topology of series link

2 运行模式

VSC_M 的功能是实现 HMG 中交流子网和直流子网之间的功率流动。其主要的控制方法有恒功率(PQ)控制、恒压恒频(V/f)控制 2 种。VSC_S 的功能是提高 HMG 对配电网的故障穿越能力, 其有串联补偿、电流限制 2 种工作模式。当配电网正常运行时, VSC_M 采用 PQ 控制, 维持 HMG 内部及其与配电网之间的功率平衡, VSC_S 不工作; 当配电网电压变化较小时, VSC_M 仍采用 PQ 控制, VSC_S 采用串联补偿模式, 以维持交流子网的正常电压水平, 保证敏感负载的平稳运行; 当配电网电压变化较大时, VSC_M 采用 V/f 控制, 以维持交流子网的正常电压水平, VSC_S 采用电流限制模式, 抑制配电网和 HMG 之间的大电流, 确保接口功率电路的安全。

下文从 VSC_S 的 2 种运行模式对串联环节的工作机理进行分析。

2.1 串联补偿模式

当配电网正常运行或配电网电压发生变化但变化幅度小于 80% 额定电压时, VSC_M 采取 PQ 控制^[11]。为了防止 HMG 交流子网的敏感负载的正常运行受到配电网电压变化的影响, 串联环节切换至串联补偿模式, 向系统注入补偿电压, 使 HMG 交流子网的电压水平始终满足敏感负载的要求。串联环节注入电压的幅值和相角均可控制。此时, 该串联环节等价于一个受控电压源。为了说明 HMG 并网接口的电路关系, 给出其单相等效电路图如图3所示。图中, U_s' 为故障状态下配电网的电压, I_s 为配电网和混合微电网之间线路上流过的电流, R_l 和 L_l 分别为混合微电网和配电网之间线路的电阻和电抗, U_c 为串联环节的补偿电压, U_L 为混合微电网交流母线的电压。

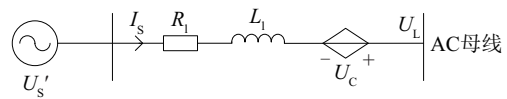


图3 串联补偿模式下 HMG 并网接口单相等效电路图

Fig. 3 Single phase equivalent circuit of grid interface of HMG in series compensation mode

由图3可得在串联补偿模式下串联环节的工作机理, 配电网电压、HMG 交流母线电压、补偿电压以及线路电压降的关系可表达为:

$$U_s' - (R_l + j\omega L_l) \times I_s + U_c = U_L \quad (1)$$

2.2 电流限制模式

当配电网电压发生变化而且变化幅度超过 80% 额

定电压时, VSC_M 采取 V/f 控制, 保证了 HMG 交流母线电压维持在故障前的电压水平^[10]。因此, HMG 交流母线与配电网之间线路上会呈现较大的电压, 如果线路阻抗很小, 该线路上便会流过很大的电流。这个大电流会影响 HMG 变流器中电力电子器件的正常运行, 甚至损坏器件。此时, 串联环节切换到电流限制模式, 控制 VSC_s 输出合适的电压到 SCT 上, 使 SCT 呈现出虚拟阻抗特性, 以限制该段线路的电流^[12]。

图 4 为电流限制模式下 HMG 并网接口单相等效电路图。故障电流 I_{fault} 可表示为式(2):

$$I_{\text{fault}} = \frac{U_L - U_s'}{Z_1} \quad (2)$$

式中, Z_1 ——配电网和 HMG 之间的线路阻抗, $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ 。

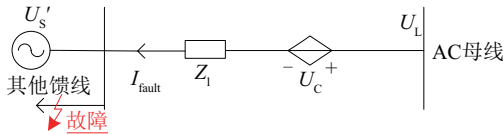


图 4 电流限制模式下 HMG 并网接口单相等效电路图

Fig. 4 Single phase equivalent circuit of grid interface of HMG in current limiting mode

为抑制故障大电流, 可控制 SCT 的输出电压超前线路电流 90° , 使其呈现为线路中串联的电抗 L_0 , 降落在 L_0 上的压降即为图 4 中的受控电压源电压 U_c 。此时, 故障电流减小为:

$$I_{\text{fault}} = \frac{U_L - U_s'}{Z_1 + j\omega L_0} \quad (3)$$

显然, 通过控制 L_0 可有效抑制该故障大电流, 从而很好保护了 HMG 中电力电子器件的安全。

3 串联环节的数学模型

由图 2 可推导出串联环节在 abc 三相坐标系下的数学模型, 如式(4)和式(5)所示。

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{fa}}{dt} + RI_{fa} = -U_{ca}' + U_{dc} S_a + U_{N0} \\ L_f \frac{dI_{fb}}{dt} + RI_{fb} = -U_{cb}' + U_{dc} S_b + U_{N0} \\ L_f \frac{dI_{fc}}{dt} + RI_{fc} = -U_{cc}' + U_{dc} S_c + U_{N0} \\ NI_{sa} = I_{fa} - C_f \frac{dU_{ca}'}{dt} \\ NI_{sb} = I_{fb} - C_f \frac{dU_{cb}'}{dt} \\ NI_{sc} = I_{fc} - C_f \frac{dU_{cc}'}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{N0} = -\frac{U_{dc}}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k \\ U_{ck}' = \frac{[U_{sk} - U_{lk} - I_{sk} Z_1]}{N}, \quad k=a,b,c \end{cases} \quad (5)$$

式中, I_{lk} ($k=a, b, c$) ——流过滤波电感 L_f 的三相电流; U_{ck}' ——滤波电容电压; U_{dc} ——直流母线电压; U_{sk} ——配电网电压; I_{sk} ——配电网和 HMG 之间线路流过的电流; U_{lk} ——HMG 交流母线电压; N ——SCT 的变比; S_k ——开关函数, 定义为:

$$S_k = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0, & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad k=a,b,c \quad (6)$$

将式(5)代入式(4), 再经过式(7)等量变换, 可得串联环节在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型, 如式(8)所示。

$$T_{abc/dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{fd}}{dt} = -U_{cd}' - RI_{fd} - U_{dc} d_{fd} + \omega L_f I_{fq} \\ L_f \frac{dI_{fq}}{dt} = -U_{cq}' - RI_{fq} - U_{dc} d_{fd} - \omega L_f I_{fd} \\ I_{fd} = C_f \frac{dU_{cd}'}{dt} - \omega C_f U_{cq}' + NI_{sd} \\ I_{fq} = C_f \frac{dU_{cq}'}{dt} - \omega C_f U_{cd}' + NI_{sq} \\ U_{ck}' = \frac{[U_{sk} - U_{lk} - I_{sk} Z_1]}{N}, \quad k=d,q \end{cases} \quad (8)$$

式中, d_{fd} —— d 轴占空比。 $d_k \leq 1$ ($k=a, b, c$) 为对应相的 PWM 占空比。 d_k 与 S_k 的关系式为:

$$S_k = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega_s t < (1 - d_k)\pi \text{ 及 } (1 + d_k)\pi < \omega_s t \leq 2\pi \\ 1, & (1 - d_k)\pi < \omega_s t \leq (1 + d_k)\pi \end{cases} \quad (9)$$

PWM 占空比 d_k 实际上是一个开关周期上开关函数 S_k 的平均值, 而 d_{fd} 是由 d_k 经式(7)等量变换得到的, 即:

$$\begin{bmatrix} d_{fd} \\ d_{fq} \end{bmatrix} = T_{abc/dq} \times \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 控制策略

4.1 串联补偿控制策略

串联补偿控制策略包括电压变化检测、参考电压生成和补偿电压的稳态与暂态控制。其控制目标是当配电网电压发生变化时保证 HMG 交流母线电压维持在

允许的电压水平范围内。考虑到传统的系统电压前馈控制策略补偿电压幅值衰减和相位偏移的缺点以及负载电压反馈控制策略动态响应不够快的不足,本文提出一种包括配电网电压前馈、负载电压和补偿电压双反馈的复合控制策略。其中负载电压指 HMG 交流母线电压。此复合控制策略既可快速又准确地检测出配电网电压的变化,具有响应速度快的优点;又可实时快速地跟踪补偿电压参考信号,提高了补偿效果的暂态稳定性。而且考虑了 LC 滤波器和 SCT 上的电压降落,可减小稳态误差。

图 5 为串联补偿控制框图。锁相环(phase locked loop, PLL)输出的相位信号与给定的电压幅值合成负载电压的标准正弦参考信号 U_{ref} 。 U_{ref} 减去 U_L 得到的误差信号输入外环调节器(PI 调节器), U_{ref} 减去 U_s 得到的信号与外环调节器的输出信号相加即可得到补偿电压的参考电压 U_{cref} 。然后, U_{cref} 减去输出补偿电压 U_c 得到的误差信号输入内环调节器(PI 调节器)以产生 VSCs 的补偿信号。

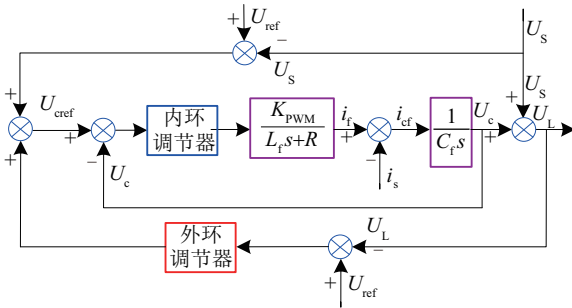


图 5 串联补偿控制框图

Fig. 5 Series compensation control block diagram

由图 5 可得出补偿电压对配电网电压的传递函数为:

$$G(s) = \frac{U_c}{U_s} = \frac{g_0 s^2 + g_1 s + g_2}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} g_0 &= K_{PWM} K_{ip} (1 + K_{vp}); \\ g_1 &= K_{PWM} [K_{ip} K_{vi} + K_{ii} (1 + K_{vp})]; \\ g_2 &= K_{PWM} K_{ii} K_{vi}; \\ a_0 &= L_f C_f; \\ a_1 &= R C_f; \\ a_2 &= K_{PWM} K_{ip} (1 + K_{vp}); \\ a_3 &= K_{PWM} [K_{ip} K_{vi} + K_{ii} (1 + K_{vp})]; \\ a_4 &= K_{PWM} K_{ii} K_{vi}. \end{aligned}$$

式中, K_{vp} 和 K_{vi} ——电压调节器的比例系数和积分系数; K_{ip} 和 K_{ii} ——电流调节器的比例系数和积分系数。

选取 $K_{PWM} = 0.8$, $K_{vp} = 0.6$, $K_{vi} = 5$, $K_{ip} = 0.01$, $K_{ii} = 0.1$, 可得图 6 所示的串联补偿模式下补偿电压对配电网电压的传递函数波特图。由图 6 可见, 系统的相角裕度 $\gamma > 0^\circ$, 幅值裕度 $h > 0$ dB, 所以系统是稳定的。

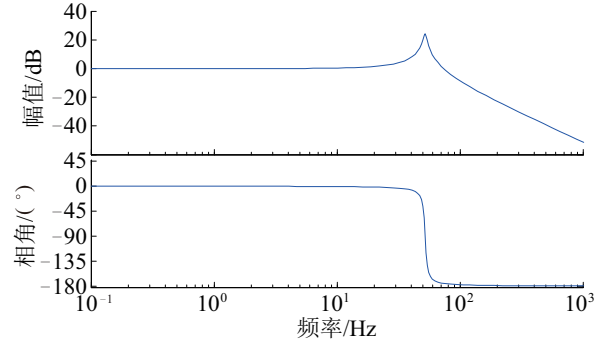


图 6 串联补偿控制波特图

Fig. 6 Series compensation control Bode diagram

4.2 电流限制控制策略

类似于串联补偿控制策略, 电流限制控制策略包括故障电流检测、参考电压生成和补偿电压的稳态与暂态控制。本文采用电压电流双闭环控制结构。参考电压采用 RL 前馈限流算法生成^[13]。在故障检测环节, 设置一个电流阈值 I_T , 其中 I_T 为配电网电压变化幅度超过 80% 额定电压时交直流 HMG 和配电网之间线路上流过的电流, 如式 (12) 所示。当 HMG 与配电网之间线路上的电流值 I_s 超过电流阈值 I_T 亦即配电网电压变化幅度超过 80% 额定电压时, 串联环节即切换至限流模式。在限流模式下, 控制 VSCs 让 SCT 输出合适的电压, 也即使其呈现出电抗特性, 以抑制过大的线路电流。此时 VSCs 不会吸收有功功率, 避免了直流侧电压浪涌。考虑到故障的最坏工况为配电网侧发生短路故障导致配电网电压降为零, 可根据式 (13) 计算出所需电抗值。

$$R_l^2 + \omega^2 L_l^2 = \frac{|U_L - 20\% U_s|^2}{I_T^2} \quad (12)$$

$$R_l^2 + \omega^2 (L_{inj} + L_l)^2 = \frac{|U_L - 0|^2}{I_T^2} \quad (13)$$

图 7 为电流限制控制框图。通过 RL 前馈限流算法, 可得 VSCs 的补偿电压参考值 U_{cref} 如式 (14) 所示。 U_{cref} 减去输出补偿反电压 U_c 得到的电压误差信号输入电压调节器(PI 调节器)以生成电感电流参考值 i_{lref} 。电感电流 i_l 跟踪 i_{lref} , 且将它们的误差信号送入电流调节器(PI 调节器)来产生 VSCs 的补偿信号。 U_{cref} 在暂态过程是一个实时变化值, 而此控制策略可快速跟踪 U_{cref} , 提高了限流过程中的暂态稳定性。

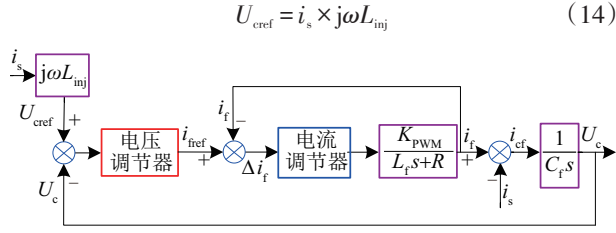


图7 电流限制控制框图

Fig. 7 Current limiting control block diagram

由图7可得出补偿电压对线路电流的传递函数为：

$$G(s) = \frac{U_c}{i_s} = \frac{b_0 s^3 + b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{c_0 s^4 + c_1 s^3 + c_2 s^2 + c_3 s + c_4} \quad (15)$$

其中，

$$\begin{aligned} b_0 &= K_{PWM} K_{ip1} K_{vp1} L_{inj}; \\ b_1 &= K_{PWM} (K_{ip1} K_{vp1} + K_{ii1} K_{vp1}) L_{inj} + K_{PWM} K_{ip1} - R; \\ b_2 &= K_{PWM} K_{ii1} K_{vi1} L_{inj} + K_{PWM} K_{ii1}; \\ b_3 &= 0; \\ c_0 &= L_f C_f; \\ c_1 &= K_{PWM} K_{ip1} C_f + R C_f; \\ c_2 &= K_{PWM} K_{ii1} C_f + K_{PWM} K_{ip1} K_{vp1}; \\ c_3 &= K_{PWM} (K_{ip1} K_{vi1} + K_{ii1} K_{vp1}); \\ c_4 &= K_{PWM} K_{ii1} K_{vi1}. \end{aligned}$$

式中， K_{vp1} 、 K_{vi1} ——电压调节器的比例系数和积分系数； K_{ip1} 、 K_{ii1} ——电流调节器的比例系数和积分系数。

选取 $K_{PWM} = 0.8$, $K_{vp1} = 0.2$, $K_{vi1} = 1$, $K_{ip1} = 1.5$, $K_{ii1} = 10$, $L_{inj} = 10$ ，可得电流限制模式下补偿电压对线路电流的传递函数波特图如图8所示。由图8可见，系统的相角裕度 $\gamma > 0^\circ$ ，幅值裕度 $h > 0$ dB，故系统稳定。而且，在100 Hz以内，串联环节等价于一个虚拟电感。

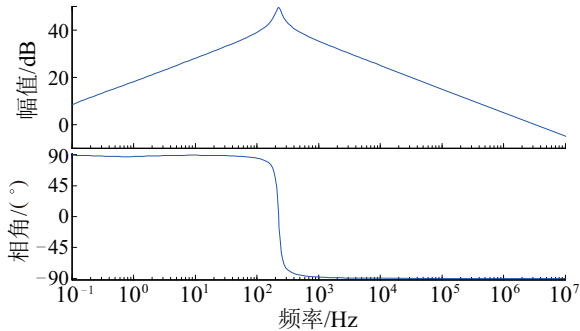


图8 电流限制控制波特图

Fig. 8 Current limiting control Bode diagram

5 系统参数的设计

表1为所设计的串联环节的参数。

表1 串联环节参数

Table 1 Parameters of series link

参数	数值	参数	数值
配电网侧电压 U_s/V	380	滤波电阻 R/Ω	0.2
交流敏感负载电压 U_l/V	380	滤波电容 $C_f/\mu F$	20
直流母线电压 U_{dc}/V	750	线路电阻 R_l/Ω	0.05
SCT变比 N	1:1	线路电抗 L_l/mH	5
滤波电感 L_f/mH	6	开关频率 K/kHz	10

在串联环节中，SCT的自身损耗和磁饱和等因素对电压的补偿和电流的限制效果具有至关重要的作用。本文中的HMG的铁芯用冷轧硅钢片叠成，其中硅钢片采用高硅片，以提高允许工作的最大工作磁密。绕组使用QZ型号的高强度的聚酯漆包线，其导电性能好，且具有足够的耐热性能和耐腐蚀能力。VSCs输出电压形成的直流偏磁容易引起SCT的磁饱和，进而导致励磁涌流过大而影响串联环节的正常运行。为了防止磁饱和发生，需要将SCT的饱和磁通量设计在 $2\Phi_m$ 以上^[14]。 Φ_m 可表示为：

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega N_1} \quad (16)$$

式中， U_m ——补偿电压幅值； N_1 ——原边绕组的匝数。

6 仿真结果及分析

6.1 串联补偿模式

图9为配电网三相电压幅值和相角跳变的波形图。可看出，0.1~0.2 s，配电网三相电压发生不平衡跌落。其中，三相电压的跌落幅度分别为52.3%、59.8%、66.9%，相角跳变分别为9.7°、8.3°、7.2°。通过配电网侧电压前馈和负载电压反馈，可快速而准确地检测出配电网侧电压的变化。

图10为复合控制策略下不平衡电压变化仿真图。串联环节采用本文所提的复合控制策略工作在串联补偿模式，它可为系统注入补偿电压。在这种模式下，HMG交流子网电压始终保持正常水平，而不受配电网电压变化的影响。同时，配电网和HMG交流母线之间线路上流过的电流是正常的。

图11为串联环节采用传统网侧电压前馈控制方法时不平衡电压变化仿真图。对比图10和图11可见，在网侧电压前馈控制方法下，串联环节在故障发生后的第1个周期内补偿的电压波形为畸变的正弦电压波形，而且此方法忽略了LC滤波器和SCT上的电压降落，在整个故障期间交流子网电压始终低于正常电压水平；而在复合控制策略下，串联环节在故障发生的瞬间会有轻微

的波动,但其在 1/4 个周期内即可补偿负载电压到理想故障前电压水平,而且在整个故障期间负载电压始终处于正常电压水平。

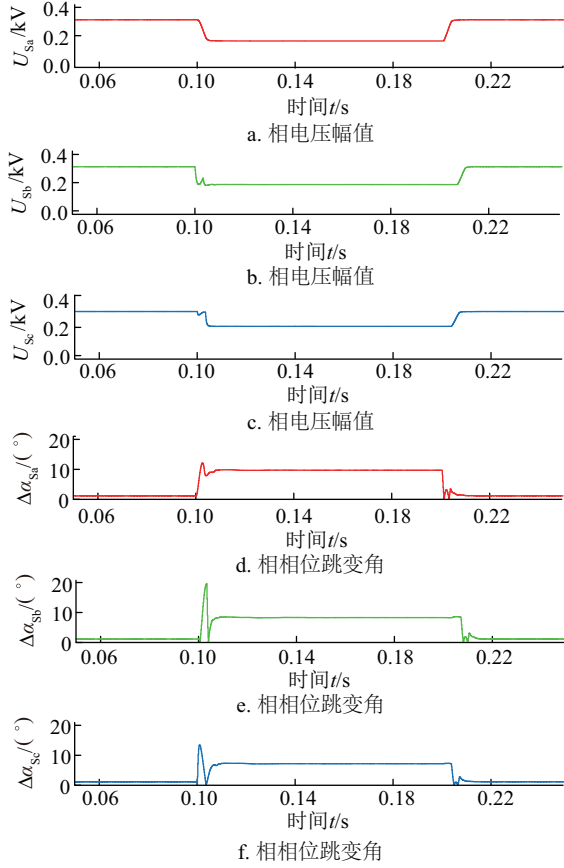


图9 配电网三相电压幅值和相位跳变波形图

Fig. 9 Amplitude and phase jump diagram of three-phase voltage of distribution network

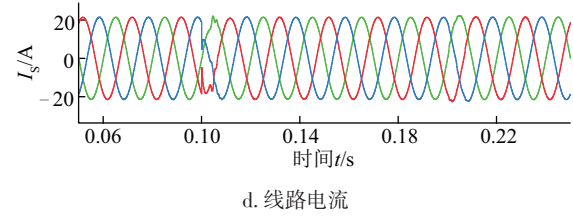
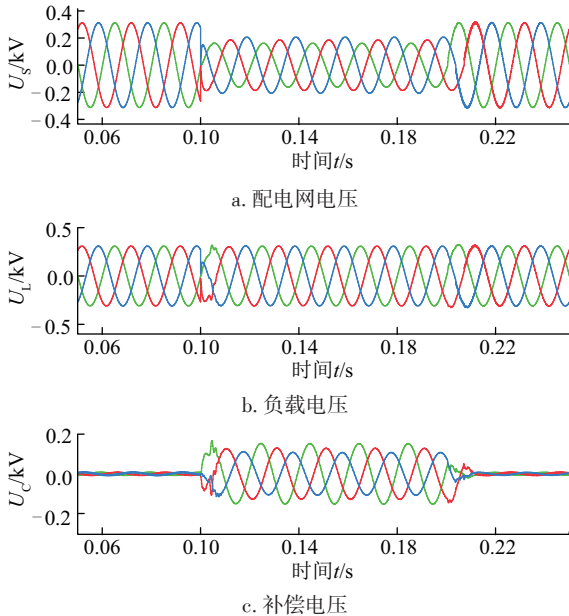


图10 复合控制策略下不平衡电压变化仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of unbalanced voltage change under composite control strategy

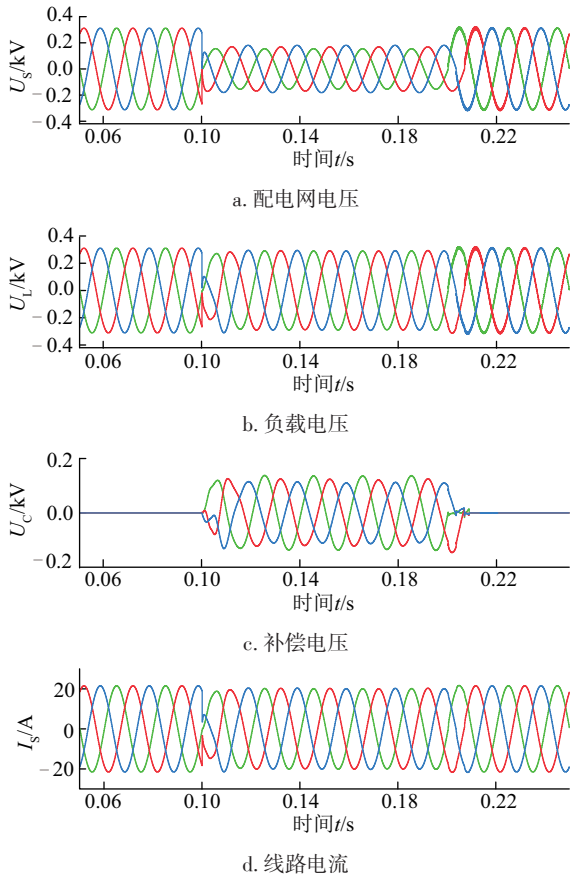


图11 传统控制方法下不平衡电压变化仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of unbalanced voltage change under traditional control methods

6.2 电流限制模式

图 12 为配电网电压跌落 90% 的仿真波形图。在 0.1 s 一个严重的电压跌落发生时, VSC_M 由 PQ 控制方式转为 V/f 控制方式运行。HMG 交流子网的电压维持恒定, 如图 12b 所示。在没有串联环节的情况下, 当配电网电压发生严重跌落时, 一个超过 200 A (大于 10 倍的正常电流值) 的故障电流将会流过 HMG 和配电网之间的线路, 如图 12d 所示。

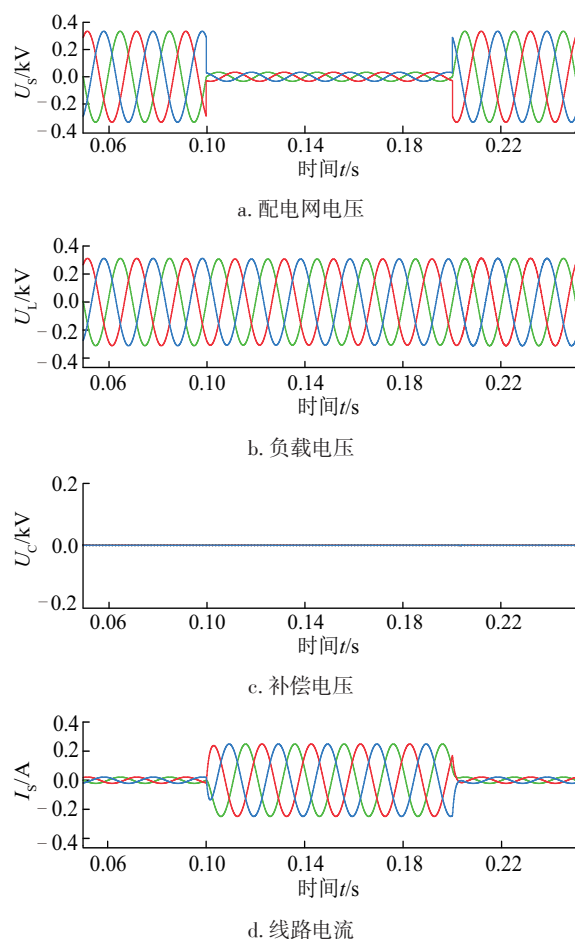


图12 电压跌落严重时无串联环节的仿真波形图

Fig. 12 Simulation diagram of serious voltage sag without series link

为了抑制此故障大电流,串联环节工作于电流限制模式。如图13c和13d所示,在故障发生的瞬间,HMG和配电网之间线路上的电流会有一个接近60A的尖刺,而从0.1~0.2s,该电流基本维持在正常水平。对比图13和图14,可看出无论SCT呈现为虚拟电抗还是虚拟阻抗,串联环节均可抑制流过HMG和配电网之间线路上的故障大电流。

在配电网发生严重故障期间,从图13c和13d亦可看出补偿电压超前线路电流 90° ;同时,如图15所示,串联环节吸收的有功功率为0kW,吸收的无功功率为8.5kvar。以上2点说明SCT此时呈现为线路中串联的虚拟电抗特性。在图16中,串联环节吸收的有功功率为5.4kW,吸收的无功功率为6.3kvar。对比图15和图16可看出,控制VSCs使SCT呈现为虚拟电抗特性时,可减少有功功率的损耗,提高系统的传输效率。

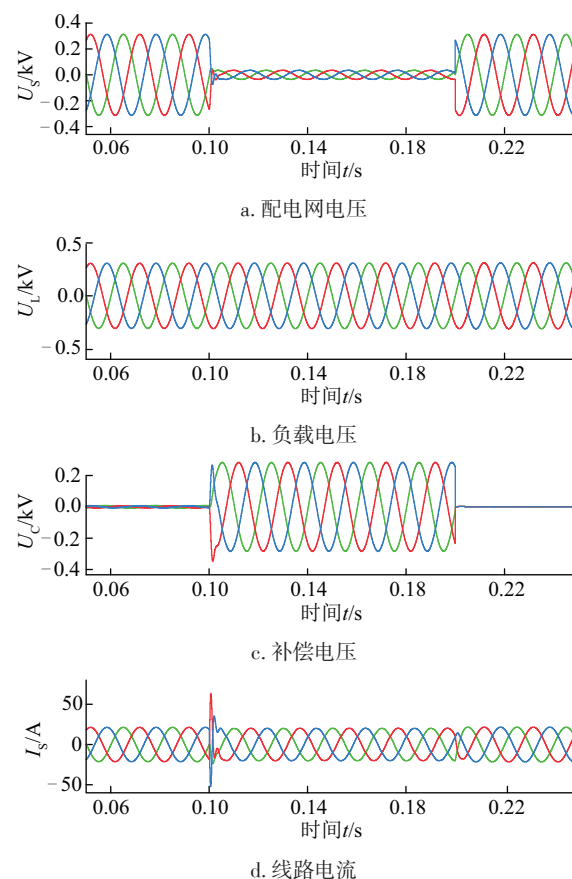
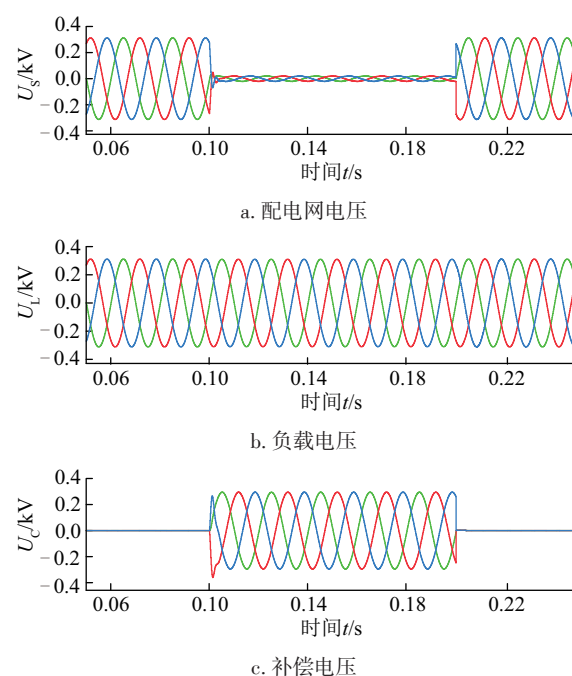
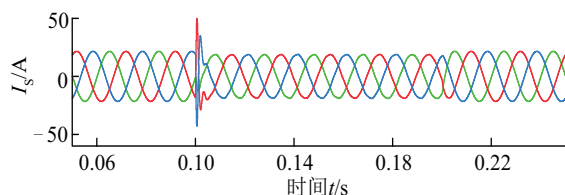
图13 电压跌落严重时含串联环节的仿真波形图
(SCT表现为虚拟电抗)

Fig. 13 Simulation diagram of serious voltage sag with series link (SCT behaves as a virtual reactance)

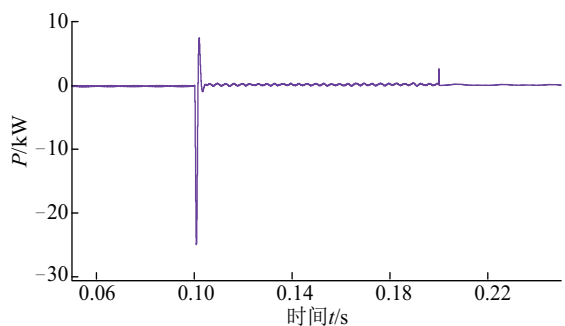




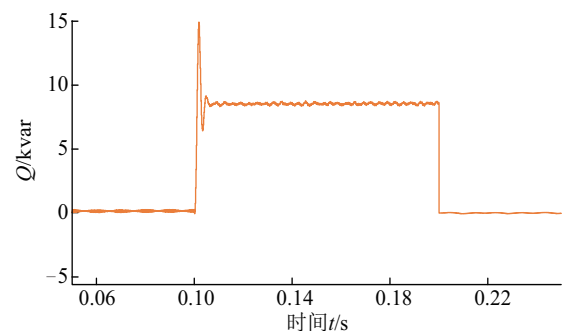
d. 线路电流

图 14 电压跌落严重时含串联环节的仿真波形图
(SCT 表现为虚拟阻抗)

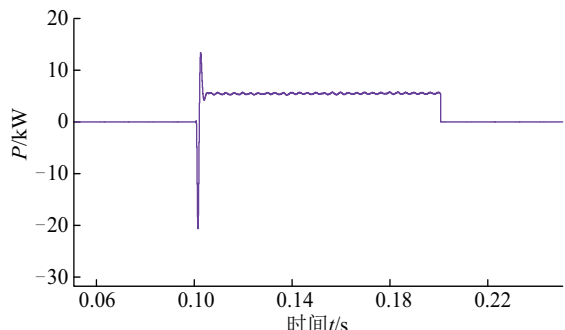
Fig. 14 Simulation diagram of serious voltage sag with series link (SCT behaves as virtual impedance)



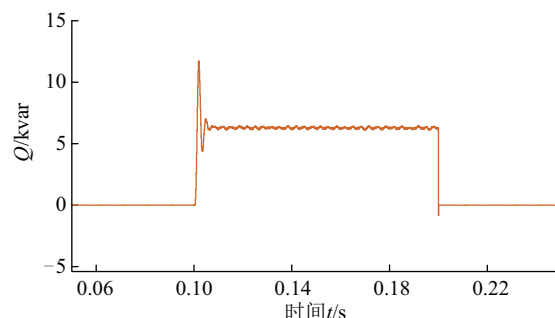
a. 串联环节吸收的有功功率



b. 串联环节吸收的无功功率

图 15 串联环节吸收功率的仿真波形图
(SCT 表现为虚拟电抗)Fig. 15 Simulation diagram of power absorbed by series link
(SCT behaves as a virtual reactance)

a. 串联环节吸收的有功功率



b. 串联环节吸收的无功功率

图 16 串联环节吸收功率的仿真波形图
(SCT 表现为虚拟阻抗)Fig. 16 Simulation diagram of power absorbed by series link
(SCT behaves as virtual impedance)

7 结 论

本文提出在配电网和交直流 HMG 之间增加串联环节,以提高 HMG 并网运行时的故障穿越能力和供电质量。该串联环节可工作于串联补偿和电流限制两种模式下,分别实现电压补偿和电流限制的功能。仿真结果表明:

1)在串联补偿模式下,采用本文所提的复合控制策略,串联环节在 1/4 个周期内即可补偿交流子网母线电压到理想故障前电压水平,而且考虑了 LC 滤波器和 SCT 上的电压降落,使交流子网母线电压在整个故障期间始终处于正常电压水平。

2)在电流限制模式下,采用电压电流双闭环控制策略,串联环节控制 SCT 输出电压超前线路电流 90°,使其呈现虚拟电抗特性,以抑制 HMG 和配电网之间线路上的故障电流。

[参考文献]

- [1] WANG P, LIU X, JIN C, et al. A hybrid AC/DC micro-grid architecture, operation and control [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2011: 1-8.
- [2] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI X L, GUO L, WANG C S, et al. Key technologies of DC microgrids: An overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [3] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING M, TIAN L G, PAN H, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid [J]. Power system protection and control, 2015, 43(9): 1-8.
- [4] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous

- operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids [J]. IEEE transactions on power electronics, 2013, 28 (5): 2214-2223.
- [5] FORUZAN E, ALGRAIN M C, ASGARPOOR S. Low-voltage ride-through simulation for microgrid systems [C]//IEEE International conference on electro information technology (EIT), Lincoln, NE, 2017: 260-264.
- [6] AMALORPAVARAJ R A J, KALIANNAN P, PADMANABAN S, et al. Improved fault ride through capability in DFIG based wind turbines using dynamic voltage restorer with combined feed-forward and feedback control [J]. IEEE access, 2017, 5: 20494-20503.
- [7] CHEN L, CHEN H K, YANG J, et al. Comparison of superconducting fault current limiter and dynamic voltage restorer for LVRT improvement of high penetration microgrid [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2017, 27(4): 1-7.
- [8] 郭文娇, 任春光, 王磊, 等. 电压不平衡时交直流双向功率变换器的控制策略 [J]. 电网技术, 2016, 40 (3): 925-930.
- GUO W J, REN C G, WANG L, et al. Control method of bidirectional AC/DC converter with unbalanced voltage in hybrid micro-grid [J]. Power system technology, 2016, 40(3): 925-930.
- [9] LI Y W, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator [J]. IEEE transactions on industry applications, 2005, 41(6): 1707-1719.
- [10] LI Y W, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications [J]. IEEE transactions on power electronics, 2006, 21(4): 1021-1031.
- [11] ZHANG Y, QU C. Table-based direct power control for three-phase AC/DC converters under unbalanced grid voltages [J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(12): 7090-7099.
- [12] 周武, 乐健, 杨金涛, 等. 中压动态电压恢复器的虚拟阻抗控制策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2525-2532.
- ZHOU W, LE J, YANG J T, et al. Control strategy of MV dynamic voltage restorer as virtual impedance [J]. Power system technology, 2016, 40(8): 2525-2532.
- [13] VILATHGAMUWA D M, LOH P C, LI Y. Protection of microgrids during utility voltage sags [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2006, 53 (5): 1427-1436.
- [14] 陈国栋, 宋晋峰, 张亮, 等. 动态电压恢复器注入变压器的直流偏磁抑制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4983-4989.
- CHEN G D, SONG J F, ZHANG L, et al. Control strategy for eliminating DC magnetic flux in the injection transformer of a dynamic voltage restorer [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4983-4989.

SERIES LINK AND ITS CONTROL BETWEEN HYBRID MICRO-GRID AND DISTRIBUTION NETWORK

Meng Runquan¹, Wei Ming¹, Gao Han¹, Wang Lei¹, Han Xiaoqing¹, Li Shengwen²

(1. Shanxi Key Lab of Power System Operation and Control (Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: In order to improve the fault ride-through capability and power quality of the AC-DC hybrid micro-grid (HMG) in grid-connected mode when the distribution network is out of order, a series compensation link (SCL) is proposed to be inserted between a distribution network and a AC-DC HMG, which cooperates with the AC/DC bidirectional power converter between the AC and DC sub-grids to improve the power supply quality of the AC sub-grid and limit excessive fault current as well. The basic structure and operation modes of the SCL are introduced firstly. Then, based on deriving the mathematical models of the SCL in abc-three-phase coordinate frame and in dq synchronous rotation coordinate frame, a voltage compensation control strategy is designed by use of distribution network voltage feedforward and load voltage, compensation voltage dual feedback, and a fault current limiting method of voltage and current dual closed-loop control structure is adopted. In addition, the transformer of the SCL is designed. Finally, the effectiveness of the proposed SCL and its control strategy has been verified by simulations.

Keywords: fault current suppression; distribution networks; power quality; micro-grids; series compensation link