

多变量保护控制策略下换流器对并网点电压支撑作用研究

朱明琳^{1,2}, 杭丽君¹, 李国杰¹

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

2. 国网上海松江供电公司, 上海 201600)

摘要: 交流电网故障下, 为了实现分布式并网发电系统的低电压穿越, 需要对并网点电压进行动态支撑。为获得对并网点电压最优动态支撑的效果, 在电网故障情况下, 采用多变量保护控制算法, 对注入的有功功率与无功功率进行了合理设计。首先回顾了分布式发电中常用的换流器拓扑结构, 并对多变量保护控制算法进行了简述。基于此, 给出了并网规范下换流器交流侧电压正序负序分量计算原则, 并给出最优电压支撑效果下需注入的功率的计算公式以及交流电流 dq 轴参考值的计算流程图。最后, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上对所提出的理论计算和设计方法进行仿真验证。

关键词: 电网电压不平衡; 多变量保护控制; 电压支撑; 分布式电源; 参数设计

Investigation of multi-variable protected strategies with voltage support under grid faults

ZHU Minglin^{1,2}, HANG Lijun¹, LI Guojie¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 2. State Grid Shanghai Songjiang Power Supply Company, Shanghai 201600, China)

Abstract: In the Distribution Generation (DG) grid-connected system, in order to realize the Low-Voltage Ride-Through (LVRT) ability, it is necessary to dynamically support the grid voltage under grid faults. In order to obtain the best support effect on the PCC voltage, the design methods of active and reactive power injections are proposed using the multi-variable protected method. First, the topologies in the DG systems and the multi-variable protected method are introduced. Then calculation principle of the positive- and negative-sequence components of converter AC side under grid codes is deduced. The formula for calculating injected power under optimal voltage support is given, and the calculation process of the AC current reference in dq axis is proposed. Finally, a simulation platform based on Matlab/Simulink is established to verify the theoretical analysis and design methods.

This work is supported by National Key Research and Development Project of China (No. 2016YFB0900201).

Key words: unbalanced grid voltages; multi-variable protection control; voltage support; DG; parameter design

0 引言

根据国家电网公司新能源接入电网技术规范(本文简称“并网规范”), 在新能源并网中, 若三相电网发生故障, 换流器不能立即离网, 在一定时间范围内除了具备低电压穿越能力外^[1], 还需对电网提供动态无功支撑。

目前在电网故障下, 换流器的控制主要集中在功率控制方面^[1-14], 有如下几种: 瞬时有功-无功控制^[1-2]、对称正序控制^[3-8]、正负序控制^[9-10]、平均有

功-无功控制^[11-12]、灵活正序和负序控制等控制算法^[12-14]。上述控制算法缺乏对并网点电压支撑的研究。

在交直流功率换流器向并网点提供电压支撑的研究方面, 文献[15-16]提出灵活调节算法, 文中比较了不同调节参数下换流器对并网点电压的支撑效果, 但对支撑效果和调节参数的关系缺少定量分析计算; 文献[17]提出光伏电站三层无功功率控制策略, 协调控制无功补偿装置和光伏逆变器间的无功输出, 从而提供有效的电压支撑; 文献[18]提出了电网故障时, 根据线路阻抗比来合理分配有功和无功功率, 实现对并网点电压支撑的目的; 文献[19-20]提出了根据故障类型、按电压差值进行无功补偿的方法。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0900201)“光伏直流并网接入实证研究平台系统集成技术及工程化技术”

本文依据电网故障条件下多变量保护控制算法^[21], 设计最优调节参数 k 和注入电网的功率, 达到给并网点电压提供最优支撑的目的。论文依据并网规范, 计算出所期望的并网点电压正序、负序的表达式, 在此基础上推导出需向电网侧注入的功率以及对应的调节参数 k 的计算公式。最后利用 Matlab/Simulink 对理论分析结果和所提出的设计方法给出了仿真验证。

1 VSC 交直流功率换流器拓扑结构

在分布式发电中, 用于不同电压等级的基本拓扑结构有以下几种类型, 两电平拓扑、三电平拓扑(中点箝位型和 T 型)以及 MMC, 各拓扑结构图如图 1—图 4 所示^[1-2]。其中两电平及三电平拓扑适用于中低压场合, 而 MMC 电路由于采用多模块级联的方式^[22], 可以叠加很高的输出电压, 更好地降低了输出谐波, 适用于高压场合。

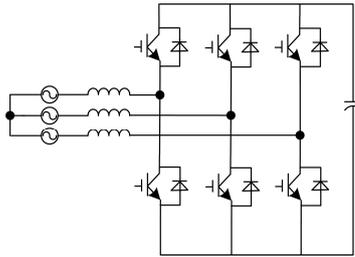


图 1 两电平拓扑结构

Fig. 1 Diagram of two-level topology

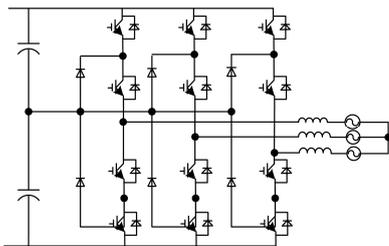


图 2 三电平拓扑结构(中点箝位型)

Fig. 2 Diagram of three-level topology (neutral point clamped converter (NPC))

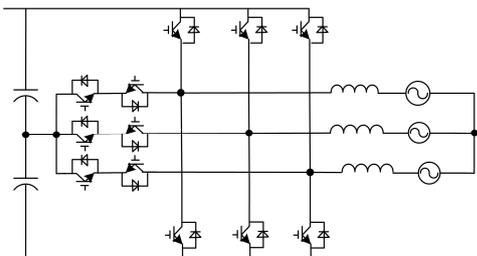


图 3 三电平拓扑结构(T 型三电平)

Fig. 3 Diagram of three-level topology (T type NPC)

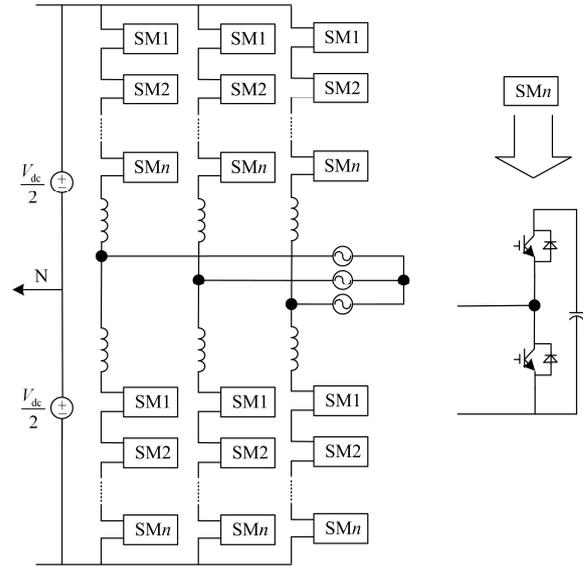


图 4 MMC 拓扑结构

Fig. 4 Diagram of MMC topology

2 电网不平衡多变量保护控制算法

在多变量保护控制中, 引入调节参数 k 可灵活控制网侧电流参考值中正序和负序分量。调节参数 k 可统一对称正序控制、正负序控制、平均有功 - 无功控制三种方法, 灵活控制 MMC 有功功率和无功功率纹波。该参数可在 -1 到 1 之间连续调节^[21]。网侧电流参考值的正序和负序的 dq 分量的具体计算公式为

$$\begin{bmatrix} i_{dref}^+ \\ i_{qref}^+ \\ i_{dref}^- \\ i_{qref}^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{U^{+2} + kU^{-2}} \begin{bmatrix} P_0 u_d^+ \\ P_0 u_q^+ \\ kP_0 u_d^- \\ kP_0 u_q^- \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{1}{U^{+2} - kU^{-2}} \begin{bmatrix} Q_0 u_q^+ \\ -Q_0 u_d^+ \\ -kQ_0 u_q^- \\ kQ_0 u_d^- \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P_0 、 Q_0 分别表示换流器中瞬时有功功率和无功功率的平均值; u_d^+ 、 u_d^- 、 u_q^+ 、 u_q^- 分别为电网电压的 d 轴正序、 d 轴负序、 q 轴正序和 q 轴负序分量幅值; U^+ 、 U^- 分别为电压向量的正序和负序的幅值。可得出 $U^{+2} = u_d^{+2} + u_q^{+2}$, $U^{-2} = u_d^{-2} + u_q^{-2}$ 。

忽略电压的零序分量, 并网点三相电压和电流可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = U^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta^+) \\ \cos(\omega t + \theta^+ - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta^+ + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + U^- \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta^-) \\ \cos(\omega t + \theta^- + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta^- - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 i_j = & I_{p1} \cos(\omega t + \theta^+ - (m-1)\frac{2\pi}{3}) + \\
 & I_{p2} \cos(\omega t + \theta^- + (m-1)\frac{2\pi}{3}) + \\
 & I_{q1} \sin(\omega t + \theta^+ - (m-1)\frac{2\pi}{3}) + \\
 & I_{q2} \sin(\omega t + \theta^- + (m-1)\frac{2\pi}{3})
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned}
 I_{p1} = & \frac{2}{3} \frac{P_0 U^+}{U^{+2} + kU^{-2}}, \quad I_{p2} = \frac{2}{3} \frac{P_0 kU^-}{U^{+2} + kU^{-2}}; \quad m=(1, 2, 3); \\
 I_{q1} = & \frac{2}{3} \frac{Q_0 U^+}{U^{+2} - kU^{-2}}, \quad I_{q2} = \frac{2}{3} \frac{Q_0 kU^-}{U^{+2} - kU^{-2}}; \quad j=(a, b, c);
 \end{aligned}$$

θ^+ 和 θ^- 分别为电压向量的正序和负序的角度。

3 换流器在多变量保护控制策略下对并网点电压支撑能力分析

本节主要分析采用多变量保护控制算法, 通过调节参数 k 来实现最优功率注入。

根据文献[18], 网侧换流器接入电网的简化电路如图 5 所示, 其中 R 、 L 为换流器注入点与电网之间的等效电阻和电感, I 为换流器注入电网电流, u_j 和 V_g 分别为换流器侧和电网侧的电压, P_1 和 Q_1 为电网侧接收的有功和无功功率。

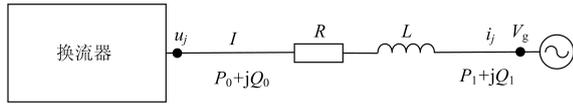


图 5 换流器接入电网简化电路

Fig. 5 Simplified circuits of the grid-connected converters

由图 5 可得出以下等式:

$$u_j = V_g + (R + \omega L) \frac{di_j}{dt} \quad j=(a, b, c) \quad (4)$$

如果 $R \ll \omega L$, 可注入无功功率支撑并网点电压。若 R 不可忽略, 可按线路电阻和感抗的比值分配有功和无功功率^[17]。

采用多变量保护控制算法, 在 $R \ll \omega L$ 时, 换流器端口电压和并网点电压的相量关系如图 6 所示。其中: V_g 为发生故障的电网侧电压; u 为并网点电压。为满足并网规范, 下面将详细推导出需要注入的功率和故障电压的关系。

由式(2)可以计算出并网点三相电压的幅值为

$$\begin{cases}
 U_a = \sqrt{U^{+2} + U^{-2} + 2U^+U^- \cos \varphi} \\
 U_b = \sqrt{U^{+2} + U^{-2} + 2U^+U^- \cos(\varphi - 2\pi/3)} \\
 U_c = \sqrt{U^{+2} + U^{-2} + 2U^+U^- \cos(\varphi + 2\pi/3)}
 \end{cases} \quad (5)$$

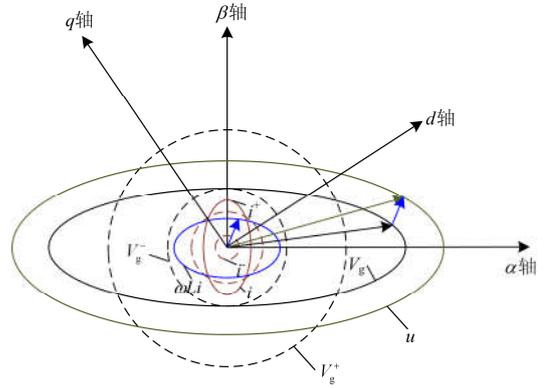


图 6 换流器端口电压和并网点电压的相量关系

Fig. 6 Vector diagrams between the output voltage of MMC and the PCC voltage

式中, $\varphi = \theta^- - \theta^+$ 。

假设 U_{\max} 、 U_{\min} 分别是并网点电压可允许的最大值和最小值, 需满足以下不等式(6)^[23]。

$$\begin{cases}
 U_{\max} \leq 1.1U \\
 U_{\min} \geq 0.85U
 \end{cases} \quad (6)$$

式中, U 为相电压幅值。

假设 $U^+ > U^-$, 根据式(5)可计算出 U^+ 、 U^- 。

$$\begin{cases}
 U^+ = \sqrt{\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4c}}{2}} \\
 U^- = \frac{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}{2\sqrt{3} \sin(\varphi - k_1\pi/3)U^+}
 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $b = U_{\max}^2 - \frac{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}{\sqrt{3} \sin(\varphi - k_1\pi/3)}$;

$c = \left(\frac{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}{2\sqrt{3} \sin(\varphi - k_1\pi/3)} \right)^2$; k_1 和 k_2 为中间变量, k_1 和 k_2 的取值依据表 1。

表 1 k_1 、 k_2 和 φ 的关系

Table 1 Relationship between k_1 , k_2 and φ		
φ	k_1	k_2
$0 \leq \varphi \leq \pi/3$	5	0
$\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi/3$	0	-1
$2\pi/3 \leq \varphi \leq \pi$	1	-1
$\pi \leq \varphi \leq 4\pi/3$	2	1
$4\pi/3 \leq \varphi \leq 5\pi/3$	3	1
$5\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi$	4	0

参数 k 、 P_0 和 Q_0 的计算分以下两种情况讨论。

1) 如果 $R \ll \omega L$, 根据式(3)、式(4)、式(5)和式(7)可计算出 k 和 Q_0 如式(8)所示。

$$\begin{cases} k = \frac{U^+ U^- - V_g^-}{U^- U^+ - V_g^+} \\ Q_0 = \frac{3 U^+ - V_g^+}{2 U^+} \frac{(U^{+2} - kU^{-2})}{\omega L} \end{cases} \quad (8)$$

2) 如果 R 和 ωL 相当, 根据式(3)、式(4)、式(5)和式(7)可计算出 k 、 Q_0 和 P_0 如式(9)所示。

$$\begin{cases} k = \frac{U^+ U^- - V_g^-}{U^- U^+ - V_g^+} \\ Q_0 = \frac{3 U^+ - V_g^+}{2 U^+} \cdot \frac{(U^{+2} + kU^{-2})(U^{+2} - kU^{-2})}{R^2(U^{+2} - kU^{-2}) + (\omega L)^2(U^{+2} + kU^{-2})} \\ P_0 = \frac{R}{\omega L} Q_0 \end{cases} \quad (9)$$

根据以上分析, 交流电流 dq 轴参考值的具体设计流程如图 7 所示。首先对线路阻抗进行估算, 并设置允许的 U_{\min} 和 U_{\max} , 然后根据式(7)可计算出并网点电压的正序和负序分量 U^+ 和 U^- 。由线路电阻和电抗的关系, 根据式(8)或式(9)分别计算出最优电压支撑效果下调节参数 k 和注入的功率。在确定调节参数 k 和注入的功率后, 根据式(1)确定交流电流 dq 轴参考值。

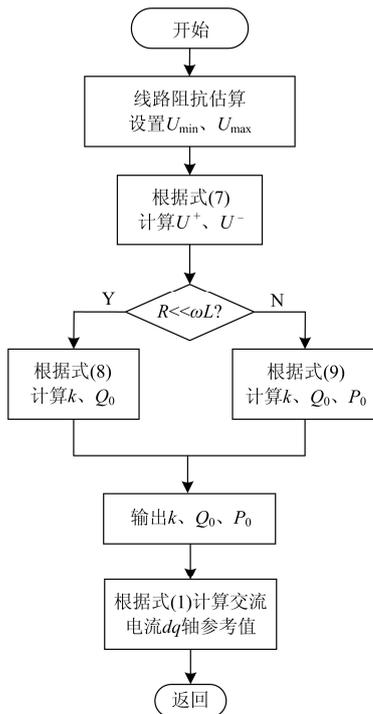


图 7 交流电流 dq 轴参考值的计算流程图

Fig. 7 Calculation process of the AC current reference in dq axis

4 仿真验证

假设线路参数满足 $R \ll \omega L$, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台对前文的控制算法进行仿真验证, 完成了 MMC 经 Δ/Y 变压器的并网仿真。三相电网平衡时仿真参数如表 2 所示, MMC 的改进控制算法如图 8 所示。其中包含子模块电容电压控制器、环流抑制控制器、交流电流控制器以及 PWM 环节。P 指比例控制器, PI 指比例积分控制器, PR 指比例谐振控制器。

表 2 三相电网平衡时仿真参数

Table 2 Simulation parameters under three-phase balanced grid

仿真参数	数值	仿真参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/kV	5.5	交流侧滤波电感/mH	4
交流侧电压/kV	10	交流侧电路内阻/ Ω	0.1
电压频率/Hz	50	桥臂电感/mH	11
变压器变比	10 kV/2.7 kV	桥臂内阻/ Ω	0.1
桥臂子模块个数	4	子模块电容/ μF	2 200

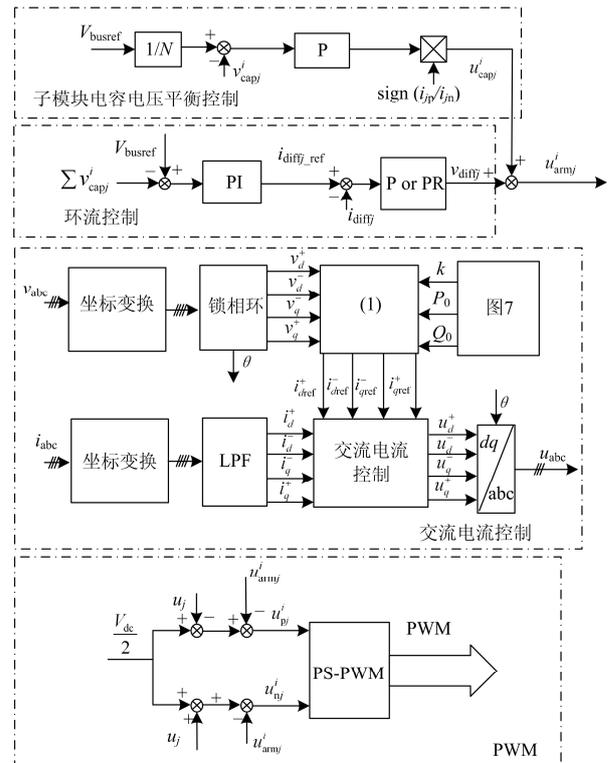


图 8 MMC 控制框图

Fig. 8 Control diagram of the MMC

电容电压控制采用的是独立电容电压控制, 在半桥型 MMC 中每个子模块电容电压参考值为直流

电压的 $1/N$, v_{capj}^i 为相单元 $j(j=a, b, c)$ 上桥臂或下桥臂第 i 个子模块电容电压的采样值, 由于电容电压的充放电状态和桥臂电流的方向有关, 因此比例调节器的输出还需要和上桥臂电流 i_{jp} 或下桥臂电流 i_{jn} 的方向相乘, 其输出 u_{capj}^i 为相单元 $j(j=a, b, c)$ 上桥臂或下桥臂第 i 个子模块电容电压的控制调节量。

每个相单元的环流控制环的参考值可以由相单元电容电压之和的控制环路输出 i_{diff_ref} 来决定。由于环流的波动以二倍频为主, 控制算法可采用比例控制或比例谐振控制算法, v_{diff} 为环流抑制控制器的输出量。

在交流电流控制器中, 由图 7 计算出最优调节参数 k 和注入的功率量 P_0 和 Q_0 , 依据式(1)计算出交流侧电流的参考值。 u_{abc} 为交流电流控制器的输出量, 将参与参考值的计算。在参考值的计算中, $u_j(j=a, b, c)$ 为交流电流控制器的输出量, u_{armj}^i 为相单元 $j(j=a, b, c)$ 上桥臂或下桥臂第 i 个子模块和环流控制器输出量 v_{diff} 的和, u_{pj}^i 为相单元 $j(j=a, b, c)$ 上桥臂第 i 个子模块的参考波, u_{nj}^i 为相单元 $j(j=a, b, c)$ 下桥臂第 i 个子模块的参考波, 经过阀级控制生成开关管的驱动信号。

MMC 系统仿真结构图如图 9 所示, L 表示线路的等效电感。设在 $t=0.2$ s 变压器 Y 侧发生 C 相电压跌落, 跌落深度为 0.5。Y 侧 A 相和 B 相的电压幅值为 10 kV, C 相电压的幅值为 5 kV。 Δ 侧 A 相和 C 相电压的幅值为 1.1 kV, B 相电压的幅值为 1.4 kV。按式(6)设置 $U_{min}=1.2$ kV, $U_{max}=1.54$ kV。按表 3 设计调节参数 k 和注入功率 Q_0 。

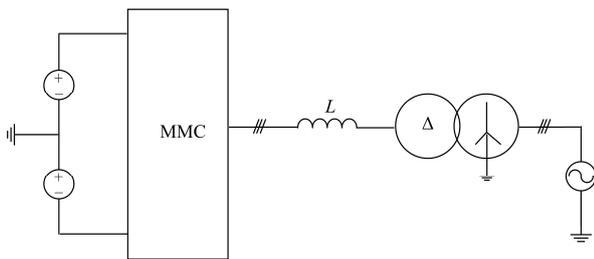


图 9 MMC 系统仿真结构图

Fig. 9 MMC system simulation structure

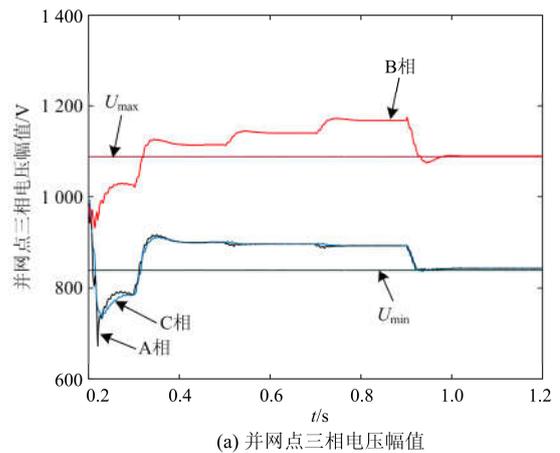
表 3 仿真中参数 k 和 Q_0

Table 3 Simulation parameter k and Q_0

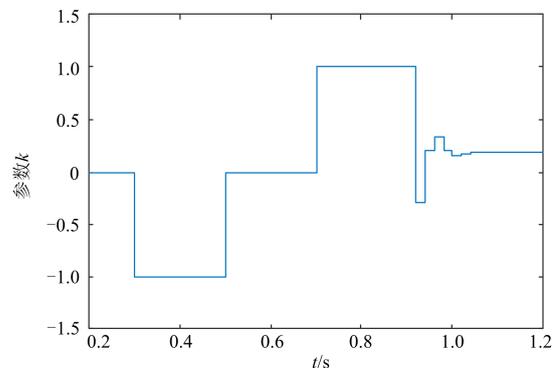
	k	Q_0	控制方法
[0.2, 0.3]	0	0	无功功率注入
[0.3, 0.5]	-1	0.4 Mvar	正负序控制
[0.5, 0.7]	0	0.4 Mvar	对称正序控制
[0.7, 0.9]	1	0.4 Mvar	平均有功-无功控制
[0.9, 1.1]	按图 7 计算	按图 7 计算	多变量保护控制

忽略线路的电阻, 设线路的电感值为 2 mH。仿真结果见图 10。其中, 图 10(a)为并网点三相电压幅值的波形, 图 10(b)为调节参数 k 的波形, 图 10(c)为注入无功功率波形, 图 10(d)为并网点三相相电压波形, 图 10(e)为并网三相相电流波形, 图 10(f)为瞬时功率波形, 图 10(g)为 A 相子模块电容电压波形, 图 10(h)为环流波形。

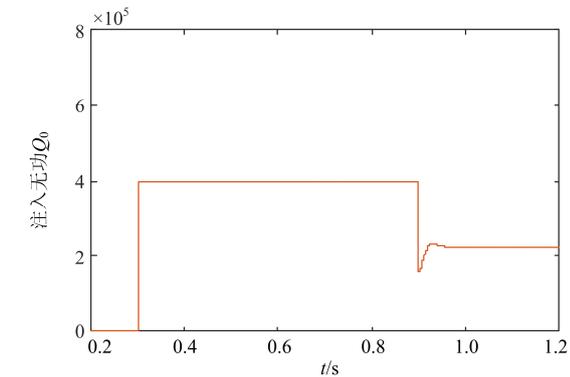
由图 10 可以看出, 在 0.2~0.3 s 内, 由于没有对 MMC 系统注入无功功率, 由图 10(a)和图 10(d)可以看出, 此时并网点的电压最低, 低于式(6)的标准要求。在 0.3~0.5 s、0.5~0.7 s 以及 0.7~0.9 s 内, 分别采用正负序控制算法、对称正序控制算法和平均有功-无功控制算法, 调节参数 k 分别设置为 -1、0 和 1, 注入无功功率 0.4 Mvar。由图 10(a)可以看出, 在这三种经典方法的控制下, 三相电压的幅值的最小值大于 U_{min} , 符合标准要求, 但三相电压的峰的最大值均超过了 U_{max} 。由此可见, 虽然采用经典方法也可实现对并网点的电压支撑, 但注入的无功功率 Q_0 不一定合理, 需适当动态调整注入的无功功率才可能保证并网点电压在规定范围内。在 0.9~1.1 s 内采用多变量保护控制, 根据图 7 可合理设计最优的调节参数 k 和 Q_0 , 减少动态调整过程。根据计算可以得出调节参数 k 为 0.18, 注入的无



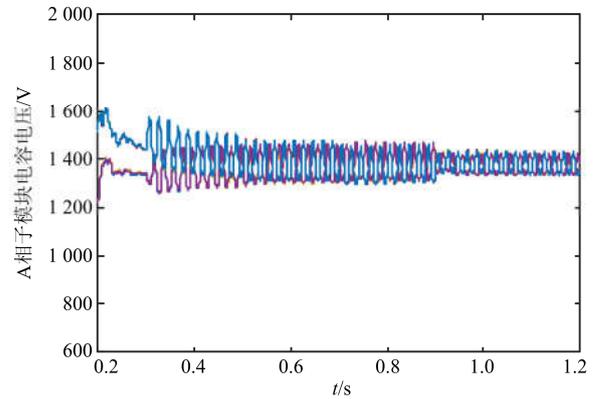
(a) 并网点三相电压幅值



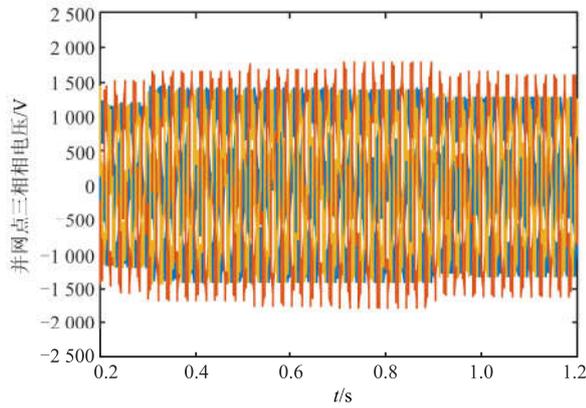
(b) 参数 k 仿真波形



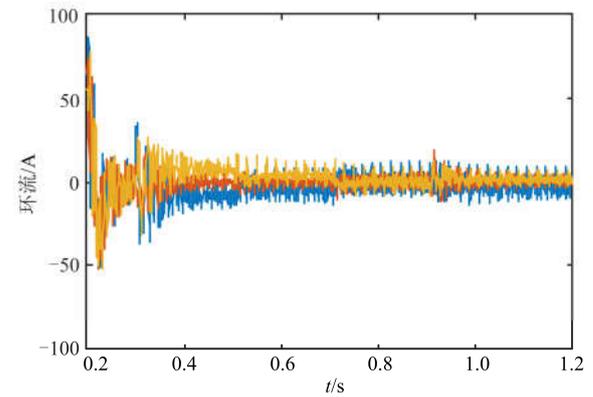
(c) 注入无功功率参考值仿真波形



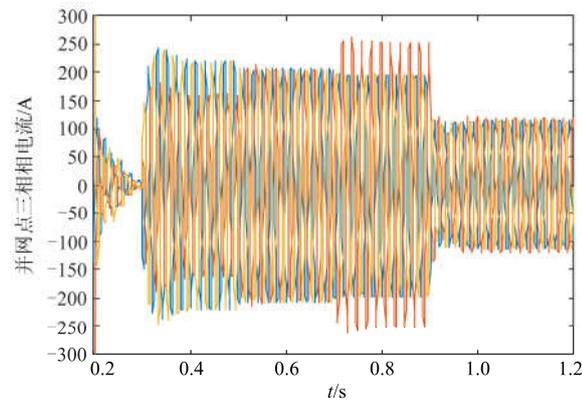
(g) A相子模块电容电压仿真波形



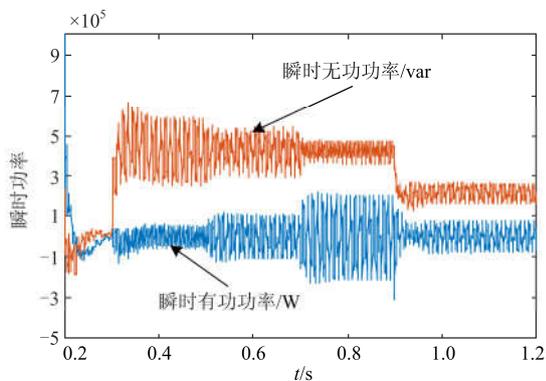
(d) 并网点三相电压仿真波形



(h) 环流仿真波形



(e) 并网三相相电流仿真波形



(f) 瞬时功率仿真波形

图 10 MMC 系统仿真结果

Fig. 10 MMC system simulation result

功率率 Q_0 为 0.22 Mvar, 分别如图 10(b)和图 10(c)所示。从图 10(a)和图 10(d)可以看出, 采用本文所提出的设计方法, 能对并网点实现电压支撑, 并将其控制在最大值和最小值范围内, 满足需求。由于 MMC 各电气量之间存在耦合关系, 参数 k 的改变同样会引起其他如功率和桥臂电压等变量的变化, 如图 10(f)–(h)所示。

5 结论

文中给出了多变量保护控制下 MMC 系统对并网点进行最优功率注入, 实现电压最优动态支撑的设计方法。针对电网不平衡故障, 计算出最优参数 k 和注入无功功率的表达式, 并给出并网点正负序电压和满足并网规范的电压最大值和最小值之间的关系, 保证 MMC 系统并网点电压符合并网规范要求。最后利用 Matlab/Simulink 仿真平台进行了仿真验证。仿真结果和理论分析一致, 由此可看出, 该保护控制算法可使 MMC 对并网点的电压提供合理的支撑。

参考文献

- [1] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRÍGUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. Chichester, UK: John Wiley-IEEE, 2011: 258-277.
- [2] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Independent PQ control for distributed power generation systems under grid faults[C] // Proceedings of the 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris: IEEE, 2006: 5185-5190.
- [3] 周林, 张林强, 李怀花, 等. 光伏并网逆变器负序分量补偿法控制策略[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1197-1203.
ZHOU Lin, ZHANG Linqiang, LI Huaihua, et al. Negative component compensation control scheme for photovoltaic grid-connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1197-1203.
- [4] 陈海荣, 张静, 屠卿瑞. 电网电压不平衡时电压源换流器型直流输电的负序电压补偿控制[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2363-2369.
CHEN Hairong, ZHANG Jing, TU Qingrui. Negative voltage compensating control of voltage source converter based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2363-2369.
- [5] 刘伟增, 周洪伟, 张磊, 等. 电网不平衡条件下光伏并网控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(4): 647-652.
LIU Weizeng, ZHOU Hongwei, ZHANG Lei, et al. Study on control strategy of grid-connected PV inverter under unbalanced grid conditions[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(4): 647-652.
- [6] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1238-1245.
GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Wulüe, et al. Analysis and control of modular multilevel converter based HVDC transmission systems during grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1238-1245.
- [7] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [8] 王春义, 郝全睿, 高峰, 等. 三相串联 MMC 直流换流站在交流故障下的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 16-25.
WANG Chunyi, HAO Quanrui, GAO Feng, et al. Control of three-phase series-connected MMC based HVDC station under unbalanced grid conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 16-25.
- [9] GUAN M Y, XU Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [10] RODRIGUE P, TIMBUS A, TEODORESCU R, et al. Reactive power control for improving wind turbine system behavior under grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1798-1801.
- [11] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V, TEODORESCU R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [12] ZHANG M, HANG L J, YAO W X, et al. A novel strategy for three-phase/switch/level (Vienna) rectifier under severe unbalanced grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4243-4252.
- [13] 赵新, 金新民, 杨捷, 等. 并网逆变器新型不平衡控制方案[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 257-265.
ZHAO Xin, JIN Xinmin, YANG Jie, et al. Novel unbalanced control scheme of grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 257-265.
- [14] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [15] 李建文, 雷亚雄, 李永刚, 等. 并网逆变器电压支撑的参考电流值[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 276-282.
LI Jianwen, LEI Yaxiong, LI Yonggang, et al. Reference current for the grid-connected inverter to support grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 276-282.
- [16] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Flexible voltage support control for three-phase distributed

- generation inverters under grid fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1429-1441.
- [17] 周林, 任伟, 廖波, 等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 168-175.
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 168-175.
- [18] 江玲, 刘邦银, 段善旭. 电网对称短路故障时分布式电源功率注入对并网点电压的支撑作用[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 669-674.
JIANG Ling, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. Supporting effect of power injection from distributed generations on voltage at grid-connected point during symmetrical short-circuit faults in power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 669-674.
- [19] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5252-5262.
- [20] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Reactive current injection protocol for low-power rating distributed generation sources under voltage sags[J]. IET Power Electronics, 2014, 8(6): 879-886.
- [21] 朱明琳, 杭丽君, 李国杰, 等. 三相电网不平衡下 MMC 多变量保护控制策略及系统运行性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2408-2418.
ZHU Minglin, HANG Lijun, LI Guojie, et al. Investigation of MMC multi-variable protected strategies and system operation characteristics under unbalanced grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2408-2418.
- [22] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.
LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.
- [23] Characteristics of the utility interface for photovoltaic systems: IEC standard 61727—2004[S]. 2004.
-
- 收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-05-15
作者简介:
朱明琳(1985—), 女, 博士, 研究方向为变换器控制、柔性直流输电、新能源发电控制技术等; E-mail: zhuminglin2003@163.com
杭丽君(1979—), 女, 副教授, 研究方向为电力电子与电力拖动; E-mail: ljhang@sjtu.edu.cn
李国杰(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源、电力系统、微电网、柔性直流输电的分析与控制。E-mail: liguojie@sjtu.edu.cn
- (编辑 魏小丽)