

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230179

电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究

罗忠游¹, 赵普志², 段玉¹, 秦艳辉¹, 李东阳³

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 3. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 随着我国西部地区风电场规模的不断增大且电源接入点稀少, 导致牵引所和风电场的耦合度较高, 电铁面临的负序问题更加严重。因此, 计及双馈风电场的主动补偿能力, 提出了一种电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略。首先, 建立了电气化铁路牵引变电所和双馈风电场的负序阻抗模型, 牵引变电所包括 V/v 接线牵引供电系统和静止无功发生器(static var generator, SVG)。其次, 分析了 V/v 接线牵引供电系统的负序特性, 推导了计及风电场主动补偿能力的负序传播模型。然后, 给出了双馈风机(doubly-fed induction generator, DFIG)的剩余容量计算方法, 提出了协同控制 SVG 与双馈风电场的负序优化补偿策略。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 验证了补偿策略的正确性和有效性。对比传统的电气化铁路负序补偿策略, 该补偿策略能有效降低 SVG 实际补偿容量, 提高装置运行年限。

关键词: 电气化铁路; 负序电流; 双馈风机; 补偿策略

A negative sequence optimization compensation strategy for an electrified railway connected to wind power integration areas

LUO Zhongyou¹, ZHAO Puzhi², DUAN Yu¹, QIN Yanhui¹, LI Dongyang³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumchi 830011, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumchi 830063, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: With the increasing scale of wind farms in the western region of China and the scarcity of power access points, resulting in higher coupling between the traction house and wind farms, the negative sequence problem faced by the electric railway has become more serious. Therefore, considering the active compensation capability of doubly-fed wind farms, a negative sequence optimization compensation strategy is proposed for an electrified railway connecting to the power grid in a wind power area. First, the negative sequence impedance models of an electrified railway traction substation and doubly-fed wind farm are established. The traction substation includes V/v connected TPSS and a static VAR generator (SVG). Second, the negative sequence characteristics of V/v connected TPSS are analyzed, and a negative sequence propagation model including active compensation capability of the wind farm is derived. Then, the remaining capacity calculation method of a doubly-fed induction generator (DFIG) is given. A negative sequence optimization compensation strategy for controlling SVG and DFIG collaboratively is proposed. Finally, based on the Matlab/Simulink simulation platform, the correctness and effectiveness of the compensation strategy are verified. Compared with the traditional negative sequence compensation strategy for an electrified railway, the strategy proposed in this paper can effectively reduce the actual compensation capacity of SVG and increase the operating life of the device.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277126).

Key words: electrified railway; negative sequence current; doubly-fed induction generator; compensation strategy

0 引言

近年来, 以电气化铁路为代表的电气化交通和

以大规模风电为代表的新能源基地快速发展, 特别是在我国西北地区, 有限的电源接入点和公共走廊空间使得铁路牵引变电所与风电场时常接入同一公共连接点(point of common coupling, PCC), 如图1所示。由于西北地区电网具有结构薄弱、短路容量小、无功支撑不足等特点, 极易出现负序问题, 当

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277126); 国网新疆电力有限公司科技项目资助(5230DK220009)

以单相牵引供电系统作为唯一动力来源的电气化铁路接入后, 负序问题愈加严重, 给电网的安全运行带来极大的影响^[1-3]。在我国重要的甘肃、新疆风电基地, 已经出现多起因电气化铁路负序造成的风电脱网问题^[4]。因此, 亟需研究有效的负序优化补偿技术以解决风电场与电气化铁路共同接入电网的负序问题。

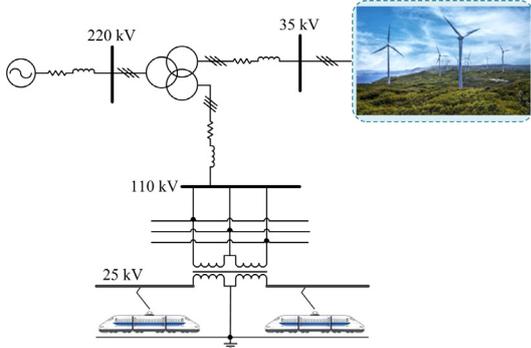


图 1 风电场与电气化铁路共同接入示意图

Fig. 1 Schematic diagram of common access of wind farm and electrified railway

针对电气化铁路负序补偿技术, 最简单的方法是优化牵引变电所结构, 包括进行变电所轮流换相和采用平衡接线形式牵引变压器, 但是由于各个牵引所的牵引负荷波动大, 两臂之间负荷的多变性导致其负序问题治理效果并不佳, 安装补偿装置成为治理负序问题的有效措施^[5]。静止无功发生器(static var generator, SVG)因其控制简单、安装方便, 近年来被广泛应用于电气化铁路的负序问题治理, 尤其是铁路的同相供电技术中, 不仅可以解决负序问题, 还能取消铁路电分相^[6-7]。SVG 作为同相供电装置可与不同接线形式的变压器相结合, 包括 Scott 变压器、V/v 变压器、YNvd 变压器以及 Vx 接线变压器等^[8-10]。文献[11-12]提出了一种基于 YNd 接线变压器与 SVG 的综合补偿方法, 分别构建了 2 端口补偿模式和 3 端口补偿模式的同相供电综合补偿数学模型, 并根据负荷特点选择补偿模式治理负序。文献[13]提出了一种基于 Dd 接线变压器及 SVG 的电气化铁路同相供电综合补偿方案, 针对不同补偿模式, 提出相应的控制策略, 验证了综合补偿方案及控制策略的正确性和可行性。文献[14]基于正、负序双闭环控制与预测电流控制, 提出了一种三相 SVG 的复合控制策略, 可实现对牵引变电所网侧负序、谐波和无功的综合补偿。然而大容量高成本的电力电子装置特点制约了 SVG 的广泛应用。

目前已有研究表明电气化铁路沿线的双馈风电场具备主动补偿能力^[15]。文献[16]将双馈风机(doubly-

fed induction generator, DFIG)变流器作为 SVG 使用, 利用 DFIG 的剩余容量对不平衡电网进行主动补偿。文献[17]提出了一种预测控制算法, 使 DFIG 改善电网电能质量的同时, 减少变流器的电容电压波动。文献[18]将外层电压环获得的补偿电流指令在机侧和网侧变流器间灵活分配, 通过协调控制 DFIG 定子及网侧逆变器, 同时输出负序电流以补偿负序电压。文献[19-20]利用直接谐振的思想, 对并网点电压进行单层谐振闭环控制, 实现了不平衡电压的补偿。上述研究为电气化铁路的负序补偿提供了新思路, 可以利用双馈风电场的剩余容量与 SVG 共同承担补偿任务以降低 SVG 的补偿容量, 关键是如何实现二者的协同补偿。

因此, 本文提出了一种电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略。首先, 建立了采用 SVG 补偿的 V/v 接线牵引变电所和双馈风电场的负序阻抗模型。其次, 分析了 V/v 接线牵引供电系统的负序特性, 建立了计及双馈风电场主动补偿能力的负序传播模型, 研究了风电场阻抗对系统负序分布的影响规律。然后, 以 DFIG 的稳态运行域为约束, 推导了定子剩余容量计算方法, 在此基础上, 提出了协同控制 SVG 与双馈风电场的负序优化补偿策略。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 验证了补偿策略的正确性和有效性。

1 等效阻抗建模

1.1 电气化铁路牵引变电所

V/v 接线牵引变压器的结构简单, 容量利用率高达 100%, 在我国高速铁路和重载铁路的牵引供电系统中广泛应用, 其牵引侧等效模型如图 2 所示。图中, 牵引侧两供电臂分别为 α 相和 β 相, 对应端口分别为 α 端口和 β 端口, \dot{E}_α^{DF} 、 \dot{E}_β^{DF} 为电网侧三相电源在直供方式牵引侧的等效电源, \dot{U}_α^{DF} 、 \dot{U}_β^{DF} 为牵引网端口的电压, i_α^{DF} 、 i_β^{DF} 为流入牵引网端口的电流; $Z_{\alpha\alpha}^{TT}$ 、 $Z_{\beta\beta}^{TT}$ 、 $Z_{\alpha\beta}^{TT}$ 分别为 α 端口自阻抗、 β 端口自阻抗以及 α 端口与 β 端口之间的互阻抗。

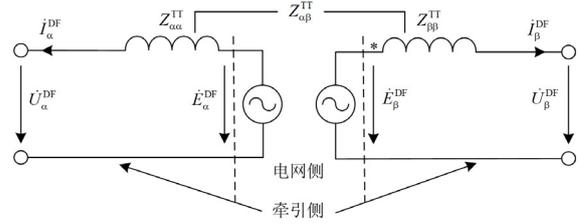


图 2 牵引侧等效模型

Fig. 2 Traction side equivalent model

列写端口电压 KCL 方程为

$$\dot{E}_{\alpha\beta}^{DF} - \dot{U}_{\alpha\beta}^{DF} = Z_{\alpha\beta \times DF}^{TT} \dot{I}_{\alpha\beta}^{DF} \quad (1)$$

式中： $\dot{U}_{\alpha\beta}^{DF}$ 为旋转坐标系下的电压值； $Z_{\alpha\beta \times DF}^{TT}$ 为直供方式牵引供电系统的牵引变压器在旋转坐标系下的等效阻抗； $\dot{I}_{\alpha\beta}^{DF}$ 为旋转坐标系下的电流值。

定义电流变换矩阵 C 为

$$C = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} K_\alpha \cos \psi_\alpha & K_\beta \cos \psi_\beta \\ K_\alpha \cos(120^\circ - \psi_\alpha) & K_\beta \cos(120^\circ - \psi_\beta) \\ K_\alpha \cos(120^\circ + \psi_\alpha) & K_\beta \cos(120^\circ + \psi_\beta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： K_α 、 K_β 分别为牵引变压器 α 端口、牵引变压器 β 端口与电网侧正序线电压的比值； ψ_α 、 ψ_β 分别为牵引变压器 α 端口、 β 端口接线相角。

则牵引供电系统电网侧电压方程为

$$\dot{E}_{abc}^{TPSS} = V^{-1} \dot{E}_{\alpha\beta} = Z_{abc \times DF}^{TT} \dot{I}_{abc} + \dot{U}_{abc} \quad (3)$$

式中： \dot{E}_{abc}^{TPSS} 为牵引系统三相坐标系下的电压数值； $V = C^T$ ； $\dot{E}_{\alpha\beta}$ 为两相坐标系下电压数值； $Z_{abc \times DF}^{TT}$ 为牵引变压器三相侧阻抗值； \dot{I}_{abc} 为三相电流数值； \dot{U}_{abc} 为三相电压数值。

因此，V/v 接线牵引供电系统三相等效阻抗模型表示为

$$\begin{aligned} Z_{abc}^{TPSS} &= \frac{\dot{E}_{abc}^{TPSS}}{\dot{I}_{abc}} = V^{-1} Z_{\alpha\beta}^{TT} C^{-1} + V^{-1} \frac{\dot{U}_{\alpha\beta}^{DF}}{\dot{I}_{\alpha\beta}^{DF}} C^{-1} = \\ &Z_{abc \times DF}^{TT} + V^{-1} Z_{\alpha\beta \times DF}^{OCS} C^{-1} = \\ &Z_{abc \times DF}^{TT} + V^{-1} \frac{|\dot{U}_{\alpha\beta}^{DF}|^2}{S_{\alpha\beta \times DF}^*} \cdot C^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： Z_{abc}^{TPSS} 为三相侧牵引供电系统总阻抗数值； $Z_{\alpha\beta}^{TT}$ 为牵引变压器两相坐标系下的阻抗值； $Z_{\alpha\beta \times DF}^{OCS}$ 为牵引网端口看入的等效阻抗值； $S_{\alpha\beta \times DF}^*$ 为牵引网端口功率。

根据坐标变换原理，牵引供电系统正负序等效阻抗 Z_{T+0} 为

$$Z_{T+0} = T Z_{abc}^{TPSS} T^{-1} \quad (5)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(4)可知，牵引供电系统三相等效阻抗由牵引变压器等效阻抗和牵引网端口等效阻抗构成，牵引网端口等效阻抗主要由牵引网压水平和牵引负荷水平决定，且当牵引网压恒定时，牵引网端口等效阻抗与牵引负荷功率呈反比。

SVG 一般安装在牵引变电所内，通过三相变压器与 V/v 接线牵引变压器一次侧共同接入 110 kV 母线，SVG 的等效电路如图 3 所示。

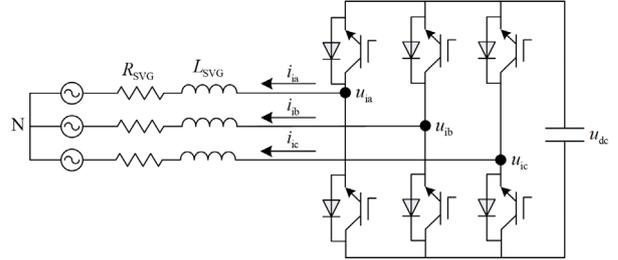


图 3 SVG 的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of SVG

假设网侧输入电阻三相相等为 R_{SVG} ；电感三相相等为 L_{SVG} 。不考虑电达到饱和的情况，即网侧输入电感理想，并规定电流正方向如图 3 所示。

三相坐标系下 SVG 电压电流方程为

$$\begin{bmatrix} L_{SVG} \frac{di_{ia}}{dt} \\ L_{SVG} \frac{di_{ib}}{dt} \\ L_{SVG} \frac{di_{ic}}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{SVG} \\ R_{SVG} \\ R_{SVG} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ia} \\ u_{ib} \\ u_{ic} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 分别为网侧电压； u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} 分别为 SVG 侧电压。

通过矩阵变换得到 SVG 的负序分量在负序同步参考坐标系下的数学模型，可表示为

$$L_{SVG} \frac{di_{i-}^-}{dt} = -(R_{SVG} - j\omega L_{SVG}) i_{i-}^- - u_{g-}^- + u_{i-}^- \quad (8)$$

式中： ω 为角速度； u_{i-}^- 和 i_{i-}^- 分别为负序旋转坐标系下 SVG 输出的负序电压和负序电流； u_{g-}^- 为负序旋转坐标系下 SVG 并网点电网的负序电压。

稳态时，式(8)等号左侧微分项为 0，则 SVG 的负序阻抗模型为

$$Z_{s-} = \frac{R_{SVG} - j\omega L_{SVG}}{\frac{u_{i-}^-}{u_{g-}^-} - 1} \quad (9)$$

由式(9)可知，SVG 的负序阻抗与其输出负序电压 u_{i-}^- 有关，通过调整负序控制环的输入指令电流，可以改变输出负序电压的大小，进而改变其负序阻抗。

1.2 双馈风电场

双馈风电场的主电路拓扑如图 4 所示，一个风电场含有多台风电机组，数量从几十到几百台不等，所有风电机组通过升压变压器连接至 35 kV 母线送

进电网。双馈风电机组由感应电机和背靠背变流器组成, 电机定子直接与电网相连, 转子通过背靠背变流器与电网相连, 其中机侧变流器(rotor side converter, RSC)与转子相连, 网侧变流器(grid side converter, GSC)与电网相连。由于 DFIG 在基频不存在正、负序耦合阻抗, 因此可单独对其进行负序阻抗建模。

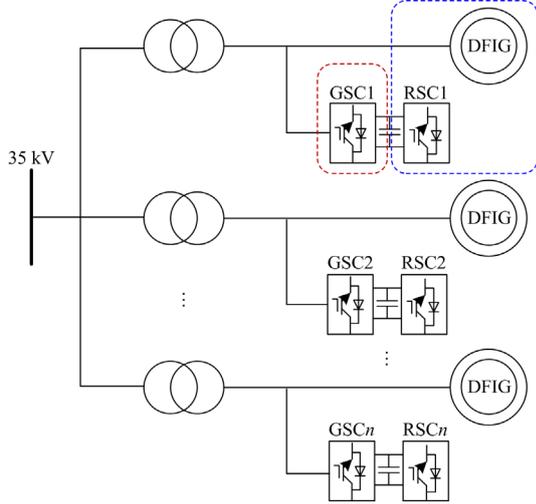


图 4 双馈风电场主电路拓扑

Fig. 4 Main circuit of DFIG-based wind farm

忽略背靠背变流器的直流母线电压波动、控制器死区及电力电子器件开关频率, 将双馈风电机组等效为 RSC+电机和 GSC 两部分, 考虑发电机(感应特性)、RSC 及其控制、GSC 及其控制、锁相环等影响, 通过在时域和频域之间、abc 与 dq 坐标系之间变换, 根据基频下负序电压、电流之间的关系, 得到 RSC 的负序阻抗模型 Z_{RSC}^- 为^[21]

$$Z_{RSC}^- = \frac{\dot{U}_{sabc}^-}{\dot{I}_{sabc}^-} = f(K_\theta, K_r, L_s, L_r, L_m) \quad (10)$$

GSC 的负序阻抗模型 Z_{GSC}^- 为

$$Z_{GSC}^- = \frac{\dot{U}_{gabc}^-}{\dot{I}_{gabc}^-} = f(K_\theta, K_g, L_{lb}) \quad (11)$$

式中: \dot{U}_{sabc}^- 为并网点负序电压; \dot{I}_{sabc}^- 为定子负序电流; \dot{I}_{gabc}^- 为 GSC 交流侧负序电流; K_θ 、 K_g 和 K_r 分别为锁相环、GSC、RSC 的 PI 控制器参数; L_{lb} 为输出滤波电感; L_s 、 L_r 和 L_m 分别为定子绕组的自感、转子绕组的自感、互感。

则单台双馈风电机组的负序阻抗 Z_{DFIG}^- 可等效为两部分的并联, 即

$$Z_{DFIG}^- = Z_{RSC}^- // Z_{GSC}^- = \frac{Z_{RSC}^- Z_{GSC}^-}{Z_{RSC}^- + Z_{GSC}^-} \quad (12)$$

单个双馈风电场看作由 n 台相同参数的双馈风电机组并联组成, 其负序阻抗 Z_W^- 为

$$Z_W^- = \frac{Z_{DFIG}^-}{n} \quad (13)$$

在风力资源的丰富地区, 通常有多个风电场, 不同风电场按照风机数量、风速差异、电气距离和机组特性等进行划分, 同一风电场的风电机组特性相同。因此, 可先将各个风电场依据式(11)进行等效聚合, 再利用同一地区不同风场之间的电气关联特性, 采用阻抗串并联等效方式即可得到整个地区的风场负序阻抗模型。

由式(10)~式(13)可知, 双馈风电场的负序阻抗与风电机组自身参数、风速及机组台数均有关。对于已投入运行的双馈风电机组, 自身参数在出厂时已设定, 一般只能通过调节风速和投入机组数改变所在支路负序阻抗。然而对于新建的双馈风电场, 可考虑调整控制参数, 使其具备主动补偿能力, 即通过输入负序电流指令, 在新的控制策略下, 使机组输出对应的负序电流, 前提是要保证风机的正常运行。

2 负序传播机理分析

2.1 牵引供电系统负序特性

V/v 接线牵引变压器一次侧三相电流为 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c , 牵引侧两臂端口电压为 \dot{U}_α 、 \dot{U}_β , 端口电流为 \dot{I}_α 、 \dot{I}_β , φ_α 、 φ_β 为端口电流滞后端口电压的相位差, 假设 K_T 为牵引变压器变比。

一次侧与二次侧电流关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

以 \dot{U}_α 为参考电压有

$$\dot{I}_\alpha = e^{-j\varphi_\alpha} I_\alpha \quad (15)$$

$$\dot{I}_\beta = e^{j(-\varphi_\beta - 120^\circ)} I_\beta \quad (16)$$

根据对称分量法, 一次侧电流正序分量 \dot{I}^+ 为

$$\dot{I}^+ = \frac{1}{\sqrt{3}K_T} (e^{-j30^\circ} \dot{I}_\alpha + e^{j90^\circ} \dot{I}_\beta) \quad (17)$$

一次侧负序分量 \dot{I}^- 可以表示为

$$\dot{I}^- = \frac{1}{\sqrt{3}K_T} (e^{j30^\circ} \dot{I}_\alpha + e^{-j90^\circ} \dot{I}_\beta) \quad (18)$$

因此, 变电所出口处的复电流不平衡度为

$$\rho_{FT} = \frac{e^{j(30^\circ - \varphi_\alpha)} I_\alpha + e^{j(-210^\circ - \varphi_\beta)} I_\beta}{e^{j(-30^\circ - \varphi_\alpha)} I_\alpha + e^{j(-30^\circ - \varphi_\beta)} I_\beta} \quad (19)$$

由于目前电铁功率因数较高, 可近似为 $1^{[7]}$, 则有

$$\rho_{FT} = \frac{P_\alpha + e^{j120^\circ} P_\beta}{P_\alpha + P_\beta} e^{j60^\circ} \quad (20)$$

式中, P_α 、 P_β 分别为 α 、 β 端口功率。

由式(20)可知, V/v 接线牵引供电系统出口处的电流不平衡度仅与两臂功率大小有关。两臂功率差越小, 电流不平衡度越小, 当两臂功率相等时, 电流不平衡度达到最小。

2.2 负序传播模型

当双馈风电场与 V/v-SVG 牵引所共同接入电网时, PCC 的电压不平衡度受到变电所和风电场共同影响, 系统等效电路如图 5 所示。其中, Z_G^+ 、 Z_G^- 分别为电网的系统等值正序阻抗和负序阻抗; Z_T^+ 为牵引供电系统的正序等效阻抗; Z_W^+ 、 Z_W^- 分别为风电场的正负序阻抗; Z_S^+ 、 Z_S^- 分别为 SVG 的正负序阻抗; Z_{L1}^+ 、 Z_{L1}^- 分别为电网侧线路的正负序阻抗; Z_{L2}^+ 、 Z_{L2}^- 分别为牵引系统侧线路的正负序阻抗; Z_{L3}^+ 、 Z_{L3}^- 分别为风电场侧线路的正负序阻抗; i_G^+ 、 i_G^- 为电网的正序电流和负序电流; i_T^+ 、 i_T^- 分别为牵引供电系统的正序电流和负序电流; i_W^+ 、 i_W^- 分别为风电场

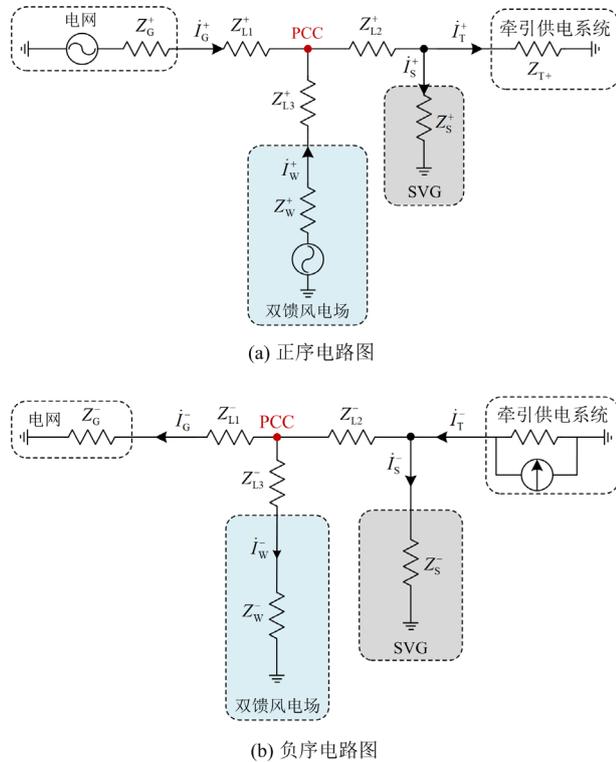


图 5 系统等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit of the system

的正序电流和负序电流; i_S^+ 、 i_S^- 分别为 SVG 的正序电流和负序电流。

PCC 的正序电压 \dot{U}_p^+ 可表示为

$$\dot{U}_p^+ = (i_T^+ + i_S^+) Z_{L2}^+ + i_T^+ Z_T^+ \quad (21)$$

PCC 的负序电压 \dot{U}_p^- 可表示为

$$\dot{U}_p^- = i_G^- (Z_{L1}^- + Z_G^-) \quad (22)$$

PCC 节点的复电压不平衡度 ε_{FP} 为

$$\varepsilon_{FP} = \frac{Z_{L1}^- + Z_G^-}{Z_{L2}^+ + Z_T^+ + \frac{Z_{L1}^-}{Z_S^-}} \left(1 - \frac{i_S^-}{i_T^-} - \frac{i_W^-}{i_T^-} \right) \rho_{FT} \quad (23)$$

其中, i_S^- 、 i_W^- 和 i_T^- 的关系为

$$i_T^- = i_S^- + i_W^- + i_G^- \quad (24)$$

$$i_G^- (Z_{L1}^- + Z_G^-) = i_W^- (Z_{L3}^- + Z_W^-) \quad (25)$$

$$\frac{i_S^- Z_S^-}{i_T^- - i_S^-} = \frac{(Z_{L1}^- + Z_G^-)(Z_{L3}^- + Z_W^-)}{Z_{L1}^- + Z_G^- + Z_{L3}^- + Z_W^-} + Z_{L2}^- \quad (26)$$

根据式(23)一式(26), ε_{FP} 可以改写为

$$\varepsilon_{FP} = k_1 \frac{Z_{L1}^- + Z_G^-}{Z_{L2}^+ + Z_T^+ + k_2} \varepsilon_{FT} \quad (27)$$

式中, ε_{FT} 为变电所出口处复电压不平衡度。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{Z_S^- (Z_{L3}^- + Z_W^-)}{(Z_{L1}^- + Z_G^-)(Z_{L3}^- + Z_W^-) + k_3} \\ k_2 = \frac{Z_T^+}{Z_S^+} \\ k_3 = (Z_{L2}^- + Z_S^-)(Z_{L1}^- + Z_G^- + Z_{L3}^- + Z_W^-) \end{cases} \quad (28)$$

由式(28)可知, PCC 的电压不平衡度与牵引所阻抗、风电场负序阻抗和线路阻抗均有关, 通过调节 Z_W^- 、 Z_S^- 都可以改变 ε_{FP} , 从而达到负序补偿的目的。

2.3 影响因素分析

风速和风电场内机组台数变化对系统负序分布的影响如图 6 和图 7 所示。随着风速和风电机组数量的增加, PCC 的电压不平衡度不断减小。由式(13)可知, 风电机组数量与风电场负序阻抗成反比, 即随着机组台数的增加, 风电场负序阻抗减小。当 DFIG 采用最大功率点追踪控制时, 可通过风速实时调整转速进而影响风电机组负序阻抗的大小, 随着风速的增加, 风电场负序阻抗也会减小, 风速和机组台数二者在风电场阻抗特性上体现效果相同。当风速和风机数量增多, 风电场阻抗减小, 牵引负荷产生的不平衡功率部分流向了风电场支路, 使得 PCC 的不平衡度降低。

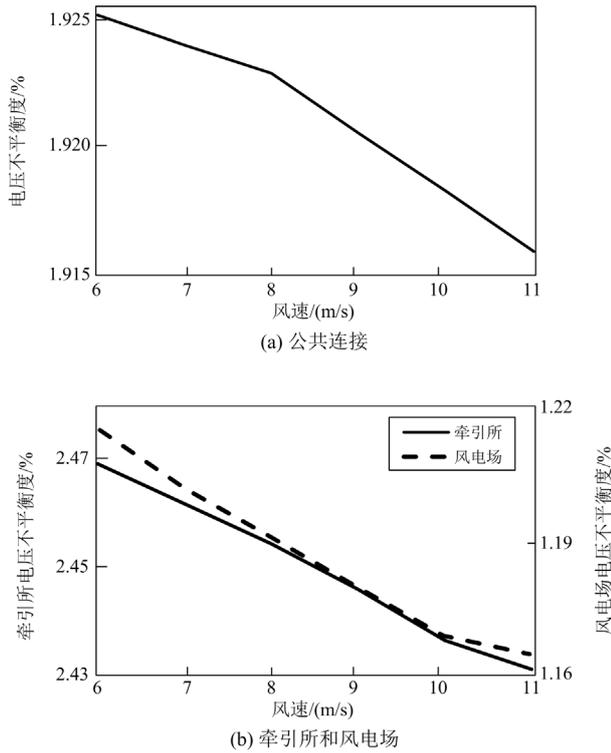


图6 风速对电压不平衡的影响

Fig. 6 Influence of wind speed on voltage imbalance

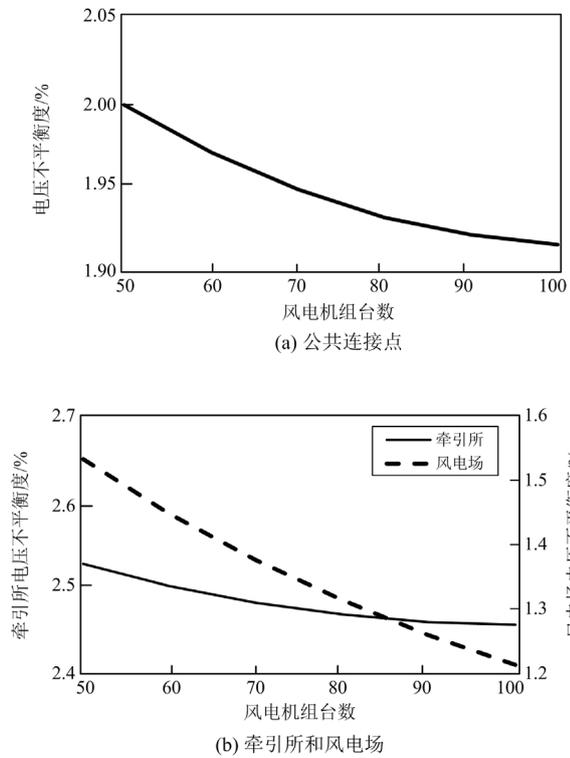


图7 风电机组台数对电压不平衡的影响

Fig. 7 Influence of machines number on voltage imbalance

3 负序优化补偿策略研究

3.1 DFIG 剩余容量计算

由上述分析可知, DFIG 的负序阻抗受控制指令的影响, 通过给定输入电流指令, 可使定子输出相应的负序电流, 即调整其负序阻抗。然而, 这种调整是受限的, 即给定的输入电流指令必须在其正常运行允许范围内, 否则会影响风机的正常运行^[22]。

DFIG 定子电流可以分解为正序分量和负序分量^[15], 可表示为

$$\dot{I}_{sdq} = \dot{I}_{sdq+}^+ + \dot{I}_{sdq-}^- e^{-j2\omega_s t} \quad (29)$$

式中: \dot{I}_{sdq} 为 DFIG 在 dq 坐标系下的定子电流, ω_s 为同步角频率, 稳态时 \dot{I}_{sdq+}^+ 为正序同步旋转坐标系下正序直流量; \dot{I}_{sdq-}^- 为负序同步旋转坐标系下负序直流量。

根据 Park 变换和对称分量法, 双馈风机发出的负序参考电流 $\dot{i}_{WF\text{ref}}^-$ 在 dq 坐标系下可表示为

$$|\dot{i}_{WF\text{ref}}^-| = \left(|\dot{i}_{sd\text{ref}}^-|^2 + |\dot{i}_{sq\text{ref}}^-|^2 \right)^{1/2} \quad (30)$$

式中: $\dot{i}_{WF\text{ref}}^-$ 为风机在 dq 坐标系下的负序参考电流; $\dot{i}_{sd\text{ref}}^-$ 为风机在 d 轴的负序参考电流; $\dot{i}_{sq\text{ref}}^-$ 为风机在 q 轴的负序参考电流。

DFIG 运行主要受到额定容量和转子电流的限制影响^[16], 即

$$\begin{cases} \dot{i}_{sd}^2 + \dot{i}_{sq}^2 \leq I_{s\text{nom}}^2 \\ \dot{i}_{sd}^2 + \left(\dot{i}_{sq} + \frac{U_{sd}}{L_m \omega_s} \right)^2 \leq \left(\frac{L_m}{L_s} I_{r\text{max}} \right)^2 \end{cases} \quad (31)$$

式中: $I_{s\text{nom}}$ 为定子额定电流; $I_{r\text{max}}$ 为转子侧变换器的电流最大值; ω_s 为转子角频率; \dot{i}_{sd} 为 d 轴输出电流; \dot{i}_{sq} 为 q 轴输出电流; U_{sd} 为 d 轴输出电压。

$\dot{I}_{WF\text{ref}}^-$ 必须满足式(32)限制, 即

$$|\dot{I}_{WF\text{ref}}^-|^2 \leq |\dot{I}_{WF\text{MAX}}^-|^2 \quad (32)$$

$$|\dot{I}_{WF\text{MAX}}^-|^2 = \max \left\{ \left(|\dot{i}_{sd}^- - \dot{i}_{sd+}^+|^2 + |\dot{i}_{sq}^- - \dot{i}_{sq+}^+|^2 \right) \right\} \quad (33)$$

式中: $\dot{I}_{WF\text{ref}}^-$ 为双馈风机发出的负序电流参考值; $\dot{I}_{WF\text{MAX}}^-$ 为 DFIG 稳定运行时可输出的负序电流最大值; \dot{i}_{sd+}^+ 为机侧变流器 d 轴正序电流值; \dot{i}_{sq+}^+ 为机侧变流器 q 轴正序电流值。只要保证输出的负序电流均小于它, 则不会影响 DFIG 的正常运行。因此, 可用 $|\dot{I}_{WF\text{MAX}}^-|$ 表征 DFIG 的负序电流最大补偿能力, 即

为 DFIG 的剩余容量^[23]。

本文以一台 1.5 MW 的双馈风机为例，其参数如表 1 所示， $I_{r\max}$ 为额定转子电流的 120%，在输出的有功功率为额定功率的条件下，根据式(31)的等号约束条件，可得图 8。

图 8 中，圆 O_1 大小由额定容量决定，圆心坐标为原点(0,0)，半径为 R_1 。圆 O_2 由转子电流决定，圆心坐标为(0, $-U_{sd}/(L_s\omega_1)$)，半径为 R_2 ，图中阴影区域为定子电流的稳定运行域。点 A 坐标为(i_{sd+}^+, i_{sq+}^+)，若已知 $|\dot{i}_{WF\text{ref}}^-|$ ，根据式(30)，则定子电流为以点 A 为圆心，以 $|\dot{i}_{WF\text{ref}}^-|$ 为半径的圆，称其为电流轨迹圆。假设点 B 为轨迹圆上一点，点 B 坐标为(i_{sd}, i_{sq})，代表某时刻定子输出电流。由上述分析可知， B_{\max} 表示 AB 两点距离的最大值，将剩余容量计算转化为几何问题：找一点 B_{\max} ，使得以 $|AB_{\max}|$ 为半径的轨迹圆在稳定运行域内，且 $|AB| \leq |AB_{\max}|$ 。根据余弦定理可得 DFIG 的剩余容量 $|\dot{i}_{WF\text{MAX}}^-|$ 为

$$|\dot{i}_{WF\text{MAX}}^-| = \min \{ |AJ|, |AL|, |AI| \} = \min \{ |R_1 - AO_1|, |R_2 - AO_2|, i_{sd+}^+ \} \quad (34)$$

表 1 双馈风机参数

Table 1 DFIG parameters

参数	数值
定子额定功率/MW	1.5
风机额定电压/V	575
定子漏感/p.u.	0.18
转子漏感/p.u.	0.16
定、转子互感/p.u.	2.9

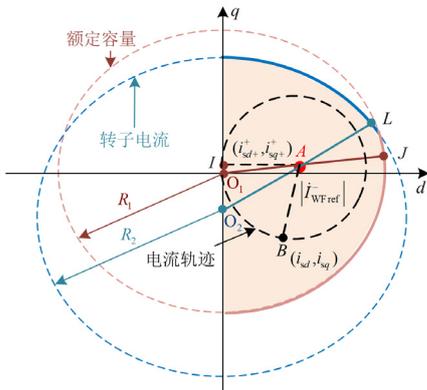


图 8 剩余容量计算示意图

Fig. 8 Remaining capacity calculation diagram

3.2 负序优化补偿策略

为最大化利用风机的剩余容量，减小牵引所

SVG 容量，提出负序优化补偿策略如图 9 所示。

上层控制的目的是精确计算 PCC 所需的补偿总电流 \dot{i}_{ref}^- ，由 2.2 节负序传播模型得到计算模块如图 10 所示。采用 PI 控制器可以消除 PCC 电压不平衡度补偿的静态误差，使得实际值 ϵ_{FP} 能精确跟踪目标值 2%。采取从 0 到 1 的限位器可以避免过度补偿造成的容量浪费。 k_c 、 k_z 为与系统阻抗相关的常数项。

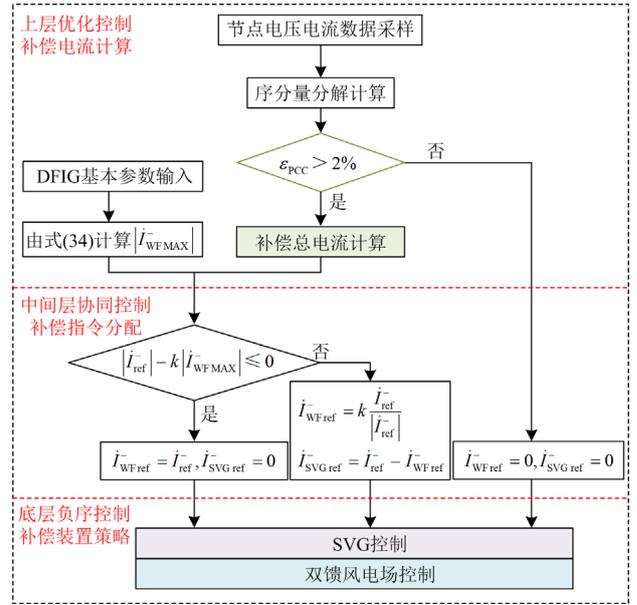


图 9 负序优化补偿策略

Fig. 9 Negative sequence optimization compensation strategy

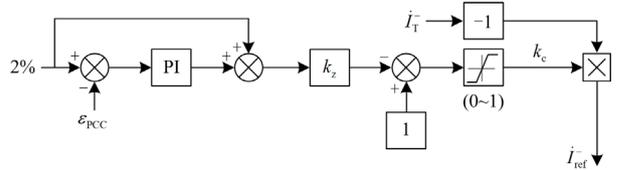


图 10 补偿总电流计算

Fig. 10 Compensation total current calculation

中间层控制的目的是进行负序补偿电流指令的分配，以实现双馈风电场和 SVG 的协同补偿。由于双馈风电场能够提供近似免费的负序补偿服务，因此在进行负序补偿时，设定双馈风电场参与治理任务的优先级最高。当检测到 PCC 处电压不平衡度超过 2% 时，优先考虑让双馈风电场输出补偿电流，这时就要考虑其负序电流补偿能力，出于安全考虑， $|\dot{i}_{WF\text{MAX}}^-|$ 不适合直接作为风机输出负序电流的最大限制，而是乘一个小于 1 的安全系数 k ，本文 k 取 0.8。若只利用双馈风电场剩余容量已经能满足补偿目标，则 SVG 无须承担补偿任务；若双馈风电场发出的负序电流在其负序电流补偿域临界点仍不能满

足补偿要求时, 即负序补偿饱和, 则剩下的补偿任务由 SVG 承担, 使电压不平衡度达到预期要求。通过以上协同控制, 能够降低牵引供电系统 SVG 实际补偿容量, 提高装置运行年限。

底层控制的目的是使负序补偿装置 SVG 和 DFIG 输出相应负序电流。SVG 负序控制环采用基于 dq 变换的间接电流控制方法, 控制框图如图 11 所示。DFIG 具体控制方法参考文献[16], 本文仅使用其转子侧变流器的负序控制。

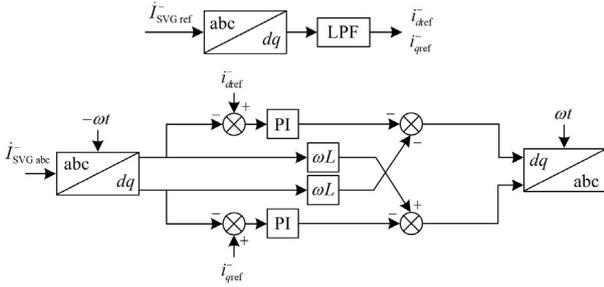


图 11 SVG 负序控制框图

Fig. 11 Negative sequence control block diagram of SVG

4 仿真分析

为了验证本文所提补偿策略的正确性和有效性, 基于 Matlab/Simulink 搭建了系统仿真模型, 结构如图 1 所示, 电网参数如表 2 所示, SVG 参数如表 3 所示。风电场共有 40 台双馈风机, 参数如表 1 所示。0~2 s 为工况 1, 未投入任何补偿装置, 此时为系统初始状态; 2~4 s 为工况 2, 采用电气化铁路传统补偿策略, 即仅投入 SVG 进行补偿; 4~6 s 为工况 3, SVG 与 DFIG 共同参与补偿, 采用本文所提出的负序优化补偿策略。

表 2 电网参数

Table 2 Parameters of power grid

参数	数值
电压等级/kV	220
短路容量比/MVA	2000
X/R	7
输电线路 L_1 /km	50
输电线路 L_2 /km	10
输电线路 L_3 /km	25

表 3 SVG 参数

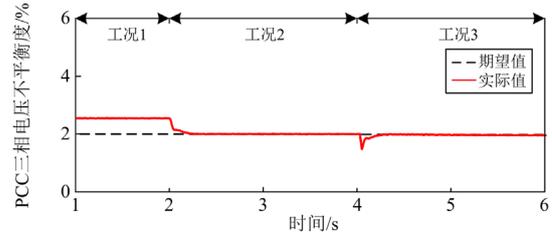
Table 3 Parameters of SVG

参数	数值
SVG 变压器变比	110/5
滤波电感/mH	1
支撑电容/mF	6
直流电压/kV	10

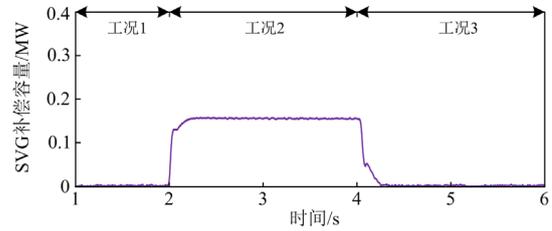
4.1 DFIG 剩余容量充足

设置牵引负荷功率: 两臂均为牵引工况, 功率为 20 MVA, 功率因数为 1。

图 12 为仿真的补偿结果, 包括 PCC 的三相电压不平衡度波形图和 SVG 补偿容量变化情况。由图 12 可知, PCC 初始电压不平衡度为 2.4%, 超过国标规定限值。2 s 时 SVG 发挥作用, 电压不平衡度维持在目标值。4 s 时 SVG 和双馈风电场在本文所提出的补偿策略下对 PCC 进行补偿, 电压不平衡度实际曲线同样能很好地跟踪目标值, 验证了本文负序传播模型的正确性, 即上层补偿电流计算能消除稳态误差, 实现精确补偿。同时, 相比工况 2, 工况 3 中 SVG 不需要承担补偿任务, 补偿容量为 0, 说明若使用本文所提补偿策略, 在具备足够补偿容量的大规模双馈风电场的情况下, 可适当减少牵引变电所的 SVG 安装容量和成本。



(a) PCC 电压不平衡度



(b) SVG 负序补偿容量

图 12 补偿结果

Fig. 12 Compensation results

补偿装置的指令电流 i_{WFref}^- 、 i_{SVGref}^- 的大小如图 13 所示。0~2 s 系统不要求补偿, 指令电流均为 0, 4 s 时采用图 9 所示的控制策略, 即优先风电场补偿。由于此时 PCC 所需的补偿量较小, 并未超出风电场的剩余容量, 因此, $i_{SVGref}^- = 0$ 。工况 3 验证了在 DFIG 剩余容量充足情况下中间层关于指令分配的正确性。

图 14(a)为 SVG 负序控制环的 dq 轴电流, 可以看出, 实际电流值很好地跟踪期望值。图 14(b)为双馈风机定子输出的负序电流变化, 在初始状态下, 由于外部电网电压不平衡, 定子电流含有负序分量, 加入 SVG 补偿后, 降低了 PCC 的电压不平衡度, 同时也降低了定子电流的负序分量。在 4~6 s, 需要

定子输出负序电流进行补偿,使得负序电流幅值增大,随着负序指令电流的增大,定子输出负序电流也在增加,输出电流可以快速跟随指令电流,图 14 验证了底层补偿装置 SVG 和双馈风机的负序控制策略的有效性。

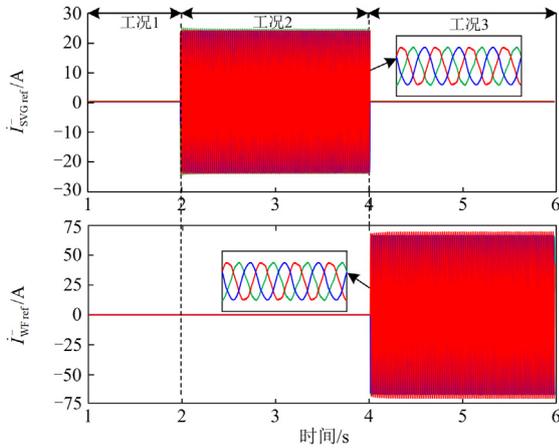
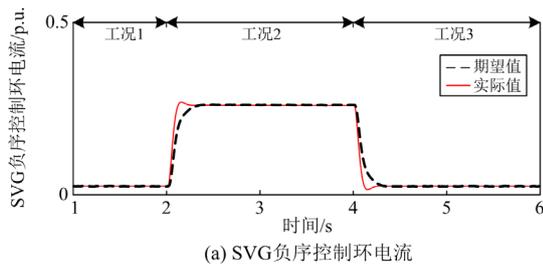
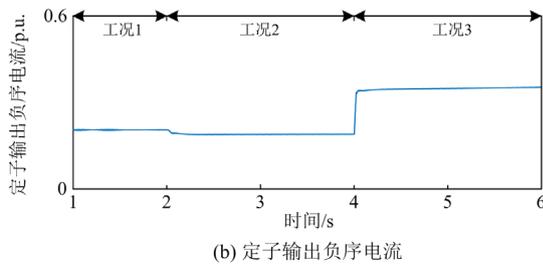


图 13 补偿电流分配

Fig. 13 Compensating current distribution



(a) SVG 负序控制环电流



(b) 定子输出负序电流

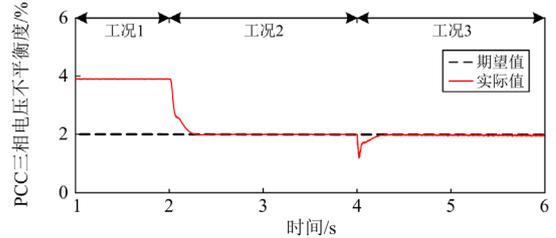
图 14 Output negative sequence current

4.2 DFIG 剩余容量不足

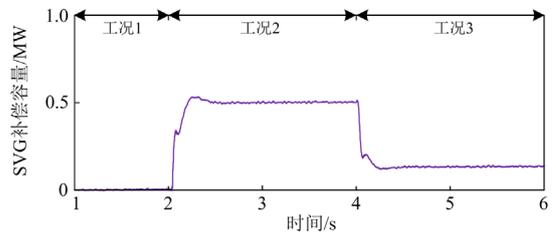
在 4.1 节仿真设置的基础上,将右臂牵引负荷功率调为 40 MVA。

仿真结果如图 15—图 17 所示。PCC 电压不平衡度依然实现了精准补偿,与 4.1 节不同的是,工况 2 中的 SVG 补偿容量大大增加,因为牵引负荷功率增加导致 PCC 初始电压不平衡度上升为 3.9%,在同样的补偿目标要求下,则需要更多的负序补偿容量。工况 3 也出现了类似的情况,由于所需的补偿容量超过了风电场的剩余容量,此时 SVG 必须和

风机共同工作,如图 16 所示, $i_{SVG\text{ref}}^-$ 不再为 0,图 13 和图 16 体现了 SVG 和风电场的协同过程,说明二者是按照提出的补偿策略分配补偿任务。同时,可以看出,工况 3 的 SVG 补偿容量比工况 2 明显减小,说明在本文提出的补偿策略下,SVG 能更长时间工作在轻载状态,提高了装置的运行年限。



(a) PCC 电压不平衡度



(b) SVG 负序补偿容量

图 15 补偿结果

Fig. 15 Compensation results

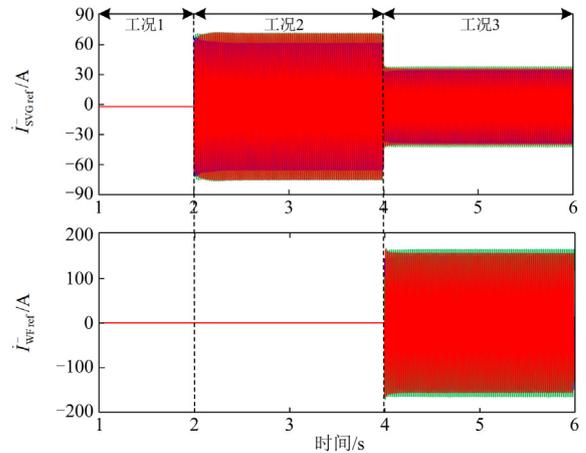
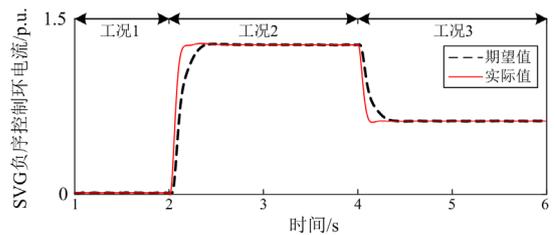


图 16 补偿电流分配

Fig. 16 Compensating current distribution



(a) SVG 负序控制环电流

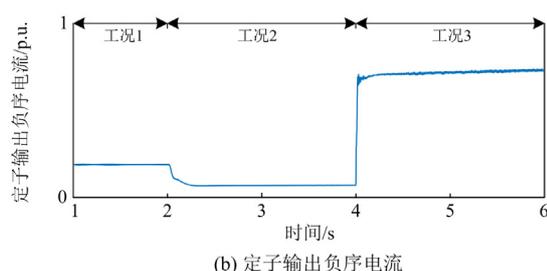


图 17 输出负序电流

Fig. 17 Output negative-sequence current

5 结论

本文提出了一种电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究, 包含上层优化控制的补偿总电流计算、中间层协同控制的电流指令分配和底层负责负序电流输出的补偿装置控制方法。分别建立了 V/v 接线牵引供电系统、SVG 和双馈风电场的负序阻抗模型, 推导了“电网-牵引变电所-双馈风电场”的负序传播模型, 揭示了系统的负序补偿原理, 为补偿策略上层的补偿总电流计算提供模型基础。以 DFIG 的稳态运行域为约束, 推导了定子剩余容量计算方法, 为补偿策略中间层的协同控制提供电流指令分配方法。得到的负序电流指令输入 SVG 和 DFIG 的负序控制环路, 使得底层的补偿装置发挥作用, 对 PCC 进行负序的协同补偿, 在 Matlab/Simulink 仿真平台验证了所提补偿策略的正确性和有效性, 仿真结果表明所提策略能有效改善 PCC 的电压不平衡, 并最大化利用双馈风电场剩余容量, 减小了 SVG 安装容量。本文研究了电气化铁路与风电场的负序协同补偿策略, 后续可考虑牵引负荷与新能源场站出力的随机性, 对牵引所 SVG 的容量优化配置开展研究。

参考文献

- [1] 应宜辰, 吴命利, 杨少兵, 等. 基于支持向量机-蚁群算法的高速铁路牵引负荷参数辨识[J]. 铁道学报, 2021, 43(9): 24-31.
YING Yichen, WU Mingli, YANG Shaobing, et al. Identification of traction load parameters of high-speed railway based on support vector machine-ant colony algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(9): 24-31.
- [2] 季亮, 郭佳龙, 李博通, 等. 不对称电压跌落下分布式新能源多目标主动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 41-49.
JI Liang, GUO Jialong, LI Botong, et al. A multi-objective
- active control strategy for distributed generation under asymmetric voltage sag[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 41-49.
- [3] 崔森, 颜湘武, 李锐博. 提高双馈风电机组动态无功协调控制能力的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 117-129.
CUI Sen, YAN Xiangwu, LI Ruibo. Experimental research on improving the dynamic reactive power coordinated control capability of doubly-fed induction wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 117-129.
- [4] BEBARS A D, ELADL A A, ABDULSALAM G M, et al. Internal electrical fault detection techniques in DFIG-based wind turbines: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 265-286.
- [5] 唐宏伟, 唐杰, 林立. 新型电气化铁路电能质量管理体系[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 84-91.
TANG Hongwei, TANG Jie, LIN Li. New power quality management system in electrical railway[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 84-91.
- [6] 沈曼盛, 周方圆. 国内外铁路牵引供电技术发展现状及趋势[J]. 电气化铁道, 2019, 30(1): 1-7, 12.
SHEN Mansheng, ZHOU Fangyuan. Development status and trend of traction power supply technology at home and abroad[J]. Electric Railway, 2019, 30(1): 1-7, 12.
- [7] LUO A, WU C, SHENJ, et al. Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase v/v transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2844-2856.
- [8] DAI Ningyi, WONG Manchung, LAO Kengweng, et al. Modelling and control of a railway power conditioner in co-phase traction power system under partial compensation[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(5): 1044-1054.
- [9] CHEN Minwu, CHEN Yinyu, WEI Mingchi, et al. Modeling and control of a novel AT-fed cophase traction power supply system for electrified railway[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106405-106414.
- [10] CHEN Minwu, LI Qunzhan, ROBERTS Clive, et al. Modeling and performance analysis of advanced combined co-phase traction power supply system in electrified railway[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 906-916.
- [11] 王辉, 李群湛, 李晋, 等. 基于 YNd 变压器与静止无

- 功发生器的高速铁路同相供电综合补偿方案[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3739-3749.
- WANG Hui, LI Qunzhan, LI Jin, et al. Comprehensive compensation schemes of cophase power supply of high-speed railway based on YNd transformer and static var generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3739-3749.
- [12] CHEN Minwu, CHEN Yingtao, CHEN Yinyu, et al. Unified power quality management for traction substation groups connected to weak power grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4178-4189.
- [13] 王辉, 李群湛, 解绍锋, 等. 基于 Dd 接线变压器及静止无功发生器的高速铁路同相供电综合补偿方案[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 116-126.
- WANG Hui, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Comprehensive compensation scheme of cophase power supply for high-speed railway with Dd transformer and static var generator[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 116-126.
- [14] 何晓琼, 彭俊, 韩鹏程, 等. 高速铁路综合补偿器控制策略研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(9): 74-84.
- HE Xiaojiong, PENG Jun, HAN Pengcheng, et al. Study on control strategy of comprehensive compensator for high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(9): 74-84.
- [15] CHEN Yinyu, CHEN Minwu, TIAN Zhongbei, et al. Voltage unbalance management for high-speed railway considering the impact of large-scale DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1667-1677.
- [16] 年珩, 王涛, 程鹏. 适应实际电网阻抗特性的 DFIG 不平衡电压解耦补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 49-57.
- NIAN Heng, WANG Tao, CHENG Peng. An unbalanced voltage decoupling compensation technique for DFIG adaptive to grid impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 49-57.
- [17] RIACHY L, ALAWIEH H, AZZOUEZ Y, et al. A novel contribution to control a wind turbine system for power quality improvement in electrical networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 50659-50673.
- [18] XU Wei, YU Kailiang, LIU Yi, et al. Improved coordinated control of standalone brushless doubly-fed induction generator supplying nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8382-8393.
- [19] NIAN Heng, WANG Tao, ZHU Z Q. Voltage imbalance compensation for doubly fed induction generator using direct resonant feedback regulator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 614-626.
- [20] WEI Feng, ZHANG Xinan, VILATHGAMUWA D M, et al. Mitigation of distorted and unbalanced stator voltage of stand-alone doubly fed induction generators using repetitive control technique[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(8): 654-663.
- [21] 刘其辉, 逢思敏, 吴林林, 等. 大规模风电汇集系统电压不平衡机理、因素及影响规律 [J/OL]. 电工技术学报: 1-16[2022-09-25]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211447.
- LIU Qihui, PANG Simin, WU Linlin, et al. The mechanism, factors and influence rules of voltage unbalance in wind power integration areas[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-16[2022-09-25]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211447.
- [22] 王耀翔, 戴朝波, 杨志昌, 等. 考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 83-90.
- WANG Yaoxiang, DAI Chaobo, YANG Zhichang, et al. Voltage control strategy for a wind farm considering the reactive capability of DFIGs[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 83-90.
- [23] PENG Y, LI Y, LEE K, et al. Coordinated control strategy of PMSG and cascaded H-bridge STATCOM in dispersed wind farm for suppressing unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 349-359.

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-08-05

作者简介:

罗忠游(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电能质量技术研究工作。E-mail: luozhongyou@126.com

(编辑 许威)