

故障下新能源场站间主动电压支撑协调控制策略

汪业正¹, 季亮¹, 常潇², 樊瑞², 李慧蓬², 洪启腾³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001;

3. 英国思克莱德大学, 英国格拉斯哥 G11EX)

摘要: 针对逆变型新能源场站在电网发生不对称故障时可能出现的电压暂降、电流越限等运行风险, 提出一种适用于电压跌落场景的站间协调控制策略, 该策略可有效实现故障下多个新能源场站对并网点电压的主动支撑。首先, 基于逆变器控制系统的输出特性, 分析不对称故障下的电压支撑原理; 其次, 为了解决输出电流在各新能源场站间的配置问题, 引入白鲸优化算法对场站的功率进行优化, 并在此基础上推导出相应的参考电流; 最后, 对电压跌落场景进行区分, 在各自场景下通过逆变器注入不同的参考电流以实现并网点电压支撑、电流限幅、改善不平衡度等多个控制目标。在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建含逆变型新能源场站的并网运行系统, 通过仿真模拟验证所提控制策略的有效性。

关键词: 新能源; 电压支撑; 不平衡度; 协调控制策略; 功率优化; 场景区分

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引言

在碳达峰、碳中和的大环境下, 新能源在电网中的发展上升到了一个新的高度^[1]。逆变器作为新能源与电网之间的重要转换装置, 在电压跌落下具备低电压穿越能力, 但出现不对称故障时, 逆变器本身存在的输出过电流、电压支撑能力不足等新能源并网的相关问题, 可能会诱发新能源场站脱网、重要设备切机等事故^[2]。因此, 如何提升新能源的电压支撑能力, 对于保证电力系统的安全稳定运行至关重要。

为克服故障时逆变器因低电压穿越能力不足而导致的电网运行韧性问题, 国内外学者展开了大量研究, 并基于逆变器的故障特性提出一系列控制策略。文献[3]提出正、负序坐标系下的矢量控制策略, 但未考虑电流限幅的影响。文献[4]在考虑电流限幅的情况下对功率进行了灵活控制, 通过设定有功、无功的固定参考值可在一定程度上实现电压支撑, 但逆变器容量不足时, 可能达不到既定的控制目标。文献[5]采用配置静止无功发生器(static var generator, SVG)的方式在电压暂降时为并网点提供无功补偿, 但如何协调无功补偿装置与电力系统的有效性还有待优化。鉴于当前新能源的渗透率正逐渐提升, 逆变器并联系统对电压扰动的鲁棒性已逐渐成为研究热点, 目前还鲜少有控制策略是针对故障状态或多逆变器系统本身的输出特性所提出的。文献[6]对新能源多场站的临界短路比展开了定性研究, 在仿真中引入了调相机的配置, 得出多个场站的接入对电压强度的影响,

但并未提出调相机与新能源场站间的协调策略。文献[7-8]采取一种灵活的控制策略, 通过调节转移因子, 确保新能源场站能同时满足电压支撑和电流限幅。文献[9]对多逆变器系统采用主从控制的协调策略, 利用从逆变器的剩余容量对电压不平衡度进行治理, 但未考虑电压不平衡跌落程度的影响, 具有一定的局限性。

基于此, 本文充分考虑不同控制目标的约束, 提出一种基于逆变器并联运行系统的协调控制策略。该策略在详细剖析电压支撑原理的基础上, 引入白鲸优化算法(beluga whale optimization, BWO)对场站的功率进行优化以解决场站各自参考电流的配置问题; 然后对电压跌落场景进行区分, 将计算出的参考电流注入到各逆变器, 从而实现并网点电压的最大化支撑; 最后根据仿真模拟验证所提控制策略的有效性。

1 逆变器并联控制系统及电压分析

1.1 逆变器并联运行系统

逆变型新能源场站简单结构如图1所示, 系统主要由新能源发电装置、逆变器、线路阻抗、负荷以及大电网构成。为简化控制和分析, 新能源直流侧采取直流电压源作为替代, 省略直流环节, 这种简化模型已被广泛应用于逆变器控制研究领域^[10]。新能源场站经LC滤波采取并联形式接入并网点, 最后与电网相接。在仿真模拟的环境下该控制系统基于并网点(point of common coupling, PCC)母线上测得的实时电

收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(520530200011); 国家自然科学基金(52081330096); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)

通信作者: 季亮(1985—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力系统控制方面的研究。jiliang@shiep.edu.cn

压,将所设定的控制对象与相应的控制算法相结合,进而计算得到各自 dq 坐标系场景下的正负序参考电流,从而实现本文的控制目标。

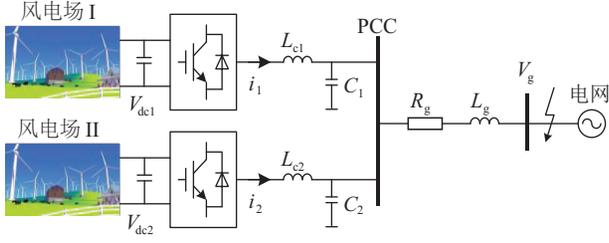


图1 新能源场站简单拓扑图

Fig. 1 Simple topology of new energy stations

1.2 不对称电压跌落下输出电压分析

本文以逆变器作为研究对象,针对逆变器并联系统的无功协调控制策略进行分析。在不对称电压跌落时,根据图1所示的拓扑结构并结合对称分量法,逆变器出口侧的电压数学表达式为:

$$\begin{cases} v^+ = v_g^+ + L_g \frac{di^+}{dt} + R_g i^+ \\ v^- = v_g^- + L_g \frac{di^-}{dt} + R_g i^- \end{cases} \quad (1)$$

式中: v^+ 、 v^- ——PCC 母线正、负序电压; v_g^+ 、 v_g^- ——电网侧母线正、负序电压; L_g 和 R_g ——线路等效电感和等效电阻。

忽略线路等效电阻 R_g 的影响,电压幅值在正负序旋转坐标系下可表示为:

$$\begin{cases} V^+ = \sqrt{(V_g^+)^2 - (\omega L_g I_d^+)^2} + \omega L_g I_q^+ \\ V^- = \sqrt{(V_g^-)^2 - (\omega L_g I_d^-)^2} - \omega L_g I_q^- \end{cases} \quad (2)$$

根据电网运行的相关标准,在发生不对称故障的情况下,为确保系统的稳定运行,需要新能源场站将 PCC 母线相电压维持在 0.85~1.10 倍额定电压以内,即:

$$V_{\min} \leq \{V_a, V_b, V_c\} \leq V_{\max} \quad (3)$$

式中: V_{\max} 取 1.1 倍额定电压; V_{\min} 取 0.85 倍额定电压。

V_{\max} 和 V_{\min} 可通过式(4)得到:

$$\begin{cases} V_{\max} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^-\alpha} \\ V_{\min} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + 2V^+V^-\beta} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \alpha = \max \left\{ \cos \varphi, \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right), \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \\ \beta = \min \left\{ \cos \varphi, \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right), \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: φ ——正负序电压间的相角关系。

由式(4)可知,通过调整正负序电压可使并网相电压维持在一个合理范围内。推导式(4)可得,正负序参考电压表达式为:

$$\begin{cases} V^+ = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 2A}}{A} \\ V^- = \frac{A}{2V^+} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A = \frac{V_{\max}^2 - V_{\min}^2}{(\alpha - \beta)} \\ B = A \cdot \alpha - V_{\max}^2 \end{cases} \quad (7)$$

2 基于电压跌落场景的新能源场站协调控制策略

电压幅值的大小在电压支撑控制时主要考虑 dq 分量下的 q 轴分量,故本文中忽略参考电流中的 d 轴分量。根据式(2),正、负序无功参考电流 $I_{q,\text{ref}}^+$ 和 $I_{q,\text{ref}}^-$ 为:

$$\begin{cases} I_{q,\text{ref}}^+ = \frac{V^+ - V_g^+}{\omega L_g} \\ I_{q,\text{ref}}^- = \frac{V_g^- - V^-}{\omega L_g} \end{cases} \quad (8)$$

通过调整逆变器控制系统计算出的正负序无功参考电流,可实现最大化电压支撑。考虑到电流越限的风险,需将逆变器输出的三相电流幅值控制在合理范围内,三相电流幅值为:

$$I_{\text{abc}} = \sqrt{(I^+)^2 + (I^-)^2 + 2I^+I^- \varphi_{\text{abc}}} \quad (9)$$

式中: φ_{abc} ——正负序三相电流间的相角关系。

通常来说,逆变器的最大允许输出电流(记作 I_{lim})不得超过其额定电流的 1.2~1.5 倍,故可得:

$$\max \{I_a, I_b, I_c\} \leq I_{\text{lim}} \quad (10)$$

式(10)是下文区分电压跌落场景的依据。

2.1 电压跌落场景

根据电压暂降标准,当电网电压跌落至 0.85 pu 以下时^[11-12]系统开始运行,计算得到正负序无功参考电流,并与最大允许输出电流值 I_{lim} 相比较。若参考电流幅值在最大输出电流值 I_{lim} 以内(即满足式(10)),则将此场景定义为电压跌落较小,反之则将其场景定义为电压跌落较大。因此,根据电网发生故障的实际情况可分为电压跌落严重和电压跌落不严重两种运行场景。电压跌落场景的原则如图2所示。

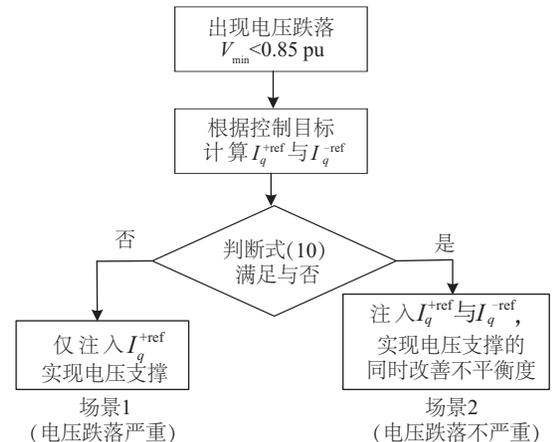


图2 电压跌落场景

Fig. 2 Voltage drop scenario

为实现本文所提控制目标,在场景1(电压跌落严重)模

式下,新能源场站将无功电压支撑作为主要控制目标,逆变器仅注入正序无功电流即可实现;在场景 2(电压跌落不严重)模式下,利用逆变器注入的正序无功电流使得序电压得到支撑的同时,电流未能越限且逆变器还有一定的容量剩余,故逆变器还可输出负序无功电流来降低电压不平衡度,进而提高并网点电压水平。

2.2 基于 BWO 算法的新能源场站功率优化

为确保逆变器在电压支撑控制期间的运行安全,如何将上文控制器计算出的正序无功参考电流合理分配到各新能源场站是一个亟需解决的问题,若各场站参考电流设置不当,系统将面临失稳风险。考虑到新能源场站输出电流与其输出功率密切相关,本文采用白鲸优化算法对各场站的功率进行优化配置^[13],可进一步得到新能源场站间的电流关系。

2.2.1 目标函数

新能源接入电网后,在遭遇干扰的情况下将对新能源场站的电压稳定性产生影响,本文将提高电压稳定性作为目标函数考虑的因素之一^[14]。同时,考虑到各新能源场站运行的经济性,构建如式(11)所示的目标函数,该目标函数综合考虑了电压稳定性以及逆变器的运行成本。

$$\min F = \sum_{i=1}^M \frac{4[(P_i X_{L_i} - Q_i R_{L_i})^2 + (P_i R_{L_i} - Q_i X_{L_i})U_i^2]}{U_i^4} + \lambda_i \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (11)$$

式中: M ——支路数量; P_i ——第 i 个逆变器输出的有功功率; Q_i ——第 i 个逆变器输出的无功功率; R_{L_i} ——第 i 条支路的等效电阻; X_{L_i} ——第 i 条支路的等效电抗; U_i ——第 i 个逆变器的等效输出电压; λ_i ——分配系数; N ——逆变器数量; a_i 、 b_i 、 c_i ——第 i 个逆变器成本系数。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_i = P_i^{\text{Load}} \\ \sum_{i=1}^N Q_i = Q_i^{\text{Load}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_i^{Load} ——新能源场站的有功负荷量; Q_i^{Load} ——新能源场站的无功负荷量。

2) 新能源电源出力约束

$$\begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \\ Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_i^{\max} 、 P_i^{\min} ——新能源场站输出的有功功率上、下限; Q_i^{\max} 、 Q_i^{\min} ——新能源场站输出的无功功率上、下限。

2.2.3 白鲸优化算法(BWO)

白鲸优化算法(BWO)是一种新型启发式优化算法,其主要模拟鲸鱼群体行动、捕食和鲸落 3 个行为,通过各阶段的协作配合,使目标问题得到最优解,相较于其他优化算法,具有较强的开发能力以及收敛速度快等特点。在 BWO 中,白

鲸作为搜索代理,每只白鲸个体都是一个候选解,在整个算法优化过程中根据其 3 个阶段的迭代更新,结合本文中目标函数(式(11)),即每只白鲸功率的候选值,根据约束条件(式(13))可设定搜索空间每一维的上下界限,从而以初始化白鲸个体的位置 X 为:

$$X = R \times (U - L) + L \quad (14)$$

式中: U 和 L ——搜索空间的上界和下界; R —— N 行 d 列数值在 $(0, 1)$ 之间的随机矩阵,其中 N 代表鲸鱼的种群规模,即待优化参量的数量, d 代表问题变量的维数,即待优化逆变器功率的数量。

对于所有白鲸个体,相应的适应度值即为式(11)的值 F , BWO 默认是求解最小值,对应式(11)的最小值。

1) 探索阶段

BWO 的探索阶段是在白鲸群泳行为基础上建立的,此时白鲸的位置更新为:

$$\begin{cases} X_{ij}^{T+1} = X_{ij}^T + (X_{r,p_1}^T - X_{i,p_j}^T)(1 + r_1)\sin(2\pi r_2), j \text{ 为偶数} \\ X_{ij}^{T+1} = X_{ij}^T + (X_{r,p_1}^T - X_{i,p_j}^T)(1 + r_1)\cos(2\pi r_2), j \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (15)$$

式中: X_{ij}^{T+1} ——第 i 条白鲸在第 j 维上更新后的位置,通过式(15)来更新寻找更佳的功率值使得 F 最小; p_j ——从 d 维中选择的随机整数; X_{i,p_j}^T ——第 i 条白鲸在 p_j 维度上的位置; X_{i,p_1}^T 和 X_{r,p_1}^T ——第 i 条和第 r 条白鲸的当前位置; r_1 和 r_2 —— $(0, 1)$ 的随机数; $\sin(2\pi r_2)$ 和 $\cos(2\pi r_2)$ ——镜像白鲸的鳍朝向水面,决定算法开发的方向。

2) 开发阶段

白鲸可根据附近鲸群位置实现合作觅食和移动,通过共享彼此的位置信息来捕食。在 BWO 的开发阶段引入莱维飞行策略,以增强收敛性,此时数学模型表示为:

$$X_i^{T+1} = r_3 X_{i,\text{best}}^T - r_4 X_i^T + C_1 \cdot L_F \cdot (X_r^T - X_i^T) \quad (16)$$

$$L_F = 0.05 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{1/\beta}} \quad (17)$$

$$\sigma = \left(\frac{T(1+\beta) \cdot \sin(\pi\beta/2)}{T[(1+\beta)/2] \cdot \beta \cdot 2^{\beta-1/2}} \right)^{1/\beta} \quad (18)$$

式中: X_i^{T+1} ——第 i 条白鲸的新位置; $X_{i,\text{best}}^T$ ——白鲸种群的最佳位置; X_i^T 和 X_r^T ——第 i 条白鲸和随机白鲸的当前位置; r_3 和 r_4 —— $(0, 1)$ 之间的随机数; C_1 ——衡量莱维飞行强度的随机跳跃强度, $C_1 = 2r_4(1 - T/T_{\max})$; L_F ——莱维飞行函数; u 和 v ——正态分布随机数; β ——默认常数, $\beta = 1.5$ 。

白鲸的当前位置即对应式(11)的功率候选取值,白鲸种群的最佳位置即为 F 最小情况下对应功率取值,功率值的更新和评价通过式(18)和式(11)进行迭代。

3) 鲸落阶段

为了模拟鲸鱼坠落的行为,选择主观假定的鲸落概率以模拟群体中的小变化。为了确保种群大小即功率组数的数量恒定,使用白鲸的位置和鲸鱼落体的步长来建立更新的位

置,数学模型表示为:

$$X_i^{T+1} = r_5 X_i^T - r_6 X_i^T + r_7 X_{\text{step}} \quad (19)$$

$$X_{\text{step}} = (b^n - b^h) \exp(-C_2 T / T_{\max}) \quad (20)$$

$$W_f = 0.1 - 0.05 T / T_{\max} \quad (22)$$

式中: $r_5 \sim r_7$ —— (0,1)之间的随机数; X_{step} —— 鲸鱼坠落的步长; C_2 —— 与鲸落概率和种群规模相关的阶跃因子, $C_2 = W_f n$; W_f —— 鲸落概率,作为线性函数计算。

鲸落概率从初始迭代的 0.1 降低到最后一次迭代的 0.05,表明在优化过程中,当白鲸更接近食物源时,白鲸的危险性降低。通过整个过程的迭代寻优,寻找到一组最佳的功率候选解,使得式(11)的结果最小化,从而达到本文的优化求解目标。

2.3 参考电流计算

本文所提场间协调优化控制策略是考虑到电流限幅的约束下,将 PCC 母线的电压支撑作为主要控制目标,改善电压不平衡度作为次要控制目标。

2.3.1 场景 1(电压跌落严重)

该场景下电网电压跌落较大,考虑到逆变器容量的限制,需要逆变器注入一定的正序有功电流,以此来提升新能源场站的低电压穿越能力。为实现电压支撑,需控制各新能源场站共同输出正序无功电流,即:

$$I_{q1}^{+ref} + I_{q2}^{+ref} = I_q^{+ref} \quad (22)$$

式中:下标 1 和 2 —— 并联的新能源场站。

由于此模式下逆变器只注入正序无功电流,故各自新能源场站的输出电流为:

$$I_1 = I_{q1}^{+ref}, I_2 = I_{q2}^{+ref} \quad (23)$$

新能源场站的输出电流与其容量的关系为:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2} \quad (24)$$

当电网遭受不对称故障后将对电力系统的电压稳定运行带来一定影响,故在考虑新能源场站经济运行的情况下结合电压稳定性对其功率进行优化分配,进而得到各场站的功率关系,如 2.2 节所示。本文主要考虑 q 轴分量对电压幅度的影响,在电压支撑时忽略 d 轴分量,故可进一步得到:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (25)$$

联合式(22)~式(25),令 $\frac{Q_1}{Q_2} = T$,可求解得到各新能源场站的无功参考电流分别为:

$$I_{q1}^{+ref} = I_q^{+ref} - I_{q2}^{+ref} \quad (26)$$

$$I_{q2}^{+ref} = \frac{I_q^{+ref}}{1+T} \quad (27)$$

2.3.2 场景 2(电压跌落不严重)

该场景下电网电压跌落较小,在逆变器注入正序无功电流以实现电压支撑后,仍有容量剩余,继续注入负序无功电流对不平衡度进行改善。根据上文计算得到的正、负序无功

参考电流,将各参考电流分配给各新能源场站,即:

$$\begin{cases} I_{q1}^{+ref} + I_{q2}^{+ref} = I_q^{+ref} \\ I_{q1}^{-ref} + I_{q2}^{-ref} = I_q^{-ref} \end{cases} \quad (28)$$

该场景下,逆变器同时注入正负序无功电流。为实现电压最大化支撑,各自新能源场站所输出相电流为:

$$\begin{cases} I_1 = \sqrt{(I_{q1}^+)^2 + (I_{q1}^-)^2} + 2I_{q1}^+ I_{q1}^- x_1 \\ I_2 = \sqrt{(I_{q2}^+)^2 + (I_{q2}^-)^2} + 2I_{q2}^+ I_{q2}^- x_2 \end{cases} \quad (29)$$

$$x_i = \left\{ \cos(\delta_i), \cos\left(\delta_i - \frac{2}{3}\pi\right), \cos\left(\delta_i + \frac{2}{3}\pi\right) \right\} \quad (30)$$

结合上文考虑成本及电压稳定性的功率优化策略,各新能源场站输出电流与输出无功功率直接相关,即:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (31)$$

考虑到电压不平衡度的存在,电压电流中除正负序分量,还会输出一定的振荡分量。为了实现更好的控制效果,还需对新能源场站的有功功率振荡进行削减,有功振荡分量的幅值为:

$$\tilde{P} = \sqrt{(V^- I_d^+ + V^+ I_d^-)^2 + (V^- I_q^+ - V^+ I_q^-)^2} \quad (32)$$

在处理新能源场站无功电流时,考虑电流输出对新能源场站的有功振荡降至最低,即当 $V^- I_q^+ - V^+ I_q^- = 0$ 时,式(32)中 \tilde{P} 最小,此时正负序无功电流与正负序电压间的关系为:

$$\frac{I_{q1}^-}{I_{q1}^+} = \frac{I_{q2}^-}{I_{q2}^+} = \frac{V^-}{V^+} \quad (33)$$

结合式(28)~式(33),令 $\frac{V^-}{V^+} = M$, $\frac{Q_1}{Q_2} = N$,可求解得到各新能源场站的无功参考电流分别为:

$$I_{q1}^{+ref} = I_q^{+ref} - I_{q2}^{+ref} \quad (34)$$

$$I_{q2}^{+ref} = \frac{I_q^{+ref}}{M} \quad (35)$$

$$I_{q1}^{-ref} = I_q^{-ref} - I_{q2}^{-ref} \quad (36)$$

$$I_{q2}^{-ref} = \frac{I_q^{-ref} \sqrt{N(A+2Bx_1)(A+2Bx_2)}}{A+2Bx_1-BN-2BNx_2} + \quad (37)$$

$$\frac{I_q^{+ref} B + (I_q^{-ref})^3 + 2I_q^{-ref} x_1 x_2}{A+2Bx_1-BN-2BNx_2} \begin{cases} A = (I_q^{+ref})^2 + (I_q^{-ref})^2 \\ B = I_q^{+ref} I_q^{-ref} \end{cases} \quad (38)$$

3 算例分析

为验证本文所提协调控制策略在不同电压跌落场景下的合理性,本节利用 Matlab/Simulink 建立图 1 所示的新能源场站并网仿真模拟系统。其中,设置逆变器最大输出电流 $I_{\text{lim}} = 1.5$ pu,相电压运行的最大、最小幅值 $V_{\text{max}} = 1.1$ pu, $V_{\text{min}} = 0.85$ pu,额定线电压为 400 V,线路电感 $L_g = 4$ mH,设定仿真运行在 0.1~0.3 s 时电网发生不对称故障,其余时间电网正常运行。电网侧设置不同的正、负序电压幅值和电压初相角对电压进行评估,同时控制系统计算出初始正、负序无功参

考电流来判定电压跌落场景划分的结果。正常运行时新能源场站采用恒功率控制策略(即 PQ 控制),故障发生时切换为本文采用的协调控制策略,实现不同场景下的控制目标。新能源场站具体仿真参数以及相关算例设置如表 1~表 3 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

参数	数值	参数	数值
额定线电压 V/V	400	直流电压 V_{dc}/kV	15
额定电流 I/A	25	正序比例系数 k_p^+	85
滤波电感 L_d/mH	2.5	正序积分系数 k_i^+	3.3
滤波电容 $L_c/\mu F$	30	负序比例系数 k_p^-	85
线路电阻 R_g/Ω	0	负序积分系数 k_i^-	3.3

表 2 仿真算例设置

Table 2 Simulation scenario setting

算例	V_g^+/pu	V_g^-/pu	$\delta^+ + \delta^-$
1	0.52	0.12	-4.7
2	0.74	0.24	3.5

表 3 场景区分结果

Table 3 Results of scenario classification

算例	I_q^+/pu	I_q^-/pu	电压跌落程度	场景区分
1	2.46	0	高	1
2	1.12	0.43	低	2

3.1 基于 BWO 算法的新能源场站功率优化分配算例分析

针对 2.2 节模型,在 Matlab 环境下进行仿真。第 1 条支路的等效电阻、电抗分别取 0.2、0.05 pu;第 2 条支路的等效电阻、电抗分别取 0.3、0.06 pu;分配系数取 0.3;逆变器数量为 2。分别采用 BWO、天牛须(beetle antenna search, BAS)和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)对算例进行仿真。BWO 参数设置:鲸落概率取(0.05, 0.1),平衡因子阈值 $B_f=0.5$,鲸群规模为 20,迭代次数为 200;BAS 参数设置:步长因子 $c_1=0.998, c_2=10$,迭代次数为 200;PSO 参数设置:粒子数目为 10,权重因子 $c_1、c_2$ 取 1.495,惯性权重 w 取 1,迭代次数为 200。

由图 3 可得, BWO 算法具有最佳的收敛精度。相较于 PSO 和 BAS 算法,选用 BWO 算法优化时,成本分别下降 5.52% 和 6.58%,同时 BWO 算法收敛速度明显优于粒子群算法。通过仿真验证 BWO 算法在该模型求解上的可行性,同时进一步证明了 BWO 算法在节约成本及收敛速度的优越性。

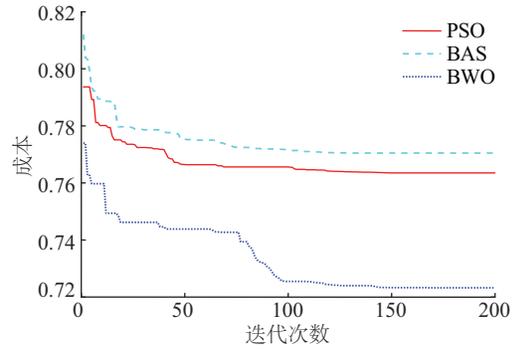


图 3 各优化算法的收敛速度

Fig. 3 Convergence speed of each optimization algorithm

将上述 3 种算法分别运行 10 次,统计适应度值,经过计算得到的适应度值的平均值和标准值如表 4 所示。由表 4 可得,重复 10 次模型求解, PSO、BAS 和 BWO 的平均适应度分别为 0.7623、0.7710 和 0.7202。从算法稳定性角度看, BWO 结果的标准差仅为 0.008, 低于其他两种算法,表明 BWO 能更加稳定地获取目标精度。由 BWO 算法结果可得, $Q_1=0.93 pu; Q_2=0.32 pu$;进一步可得到参考电流关系。

表 4 不同算法重复 10 次适应度值

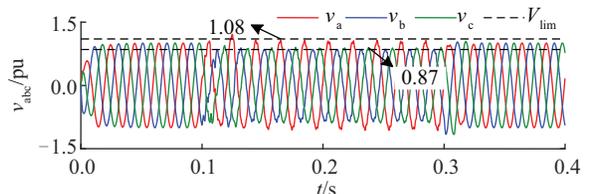
Table 4 Fitness value of different algorithms repeated 10 times

算法	平均值	标准值
PSO	0.7623	0.010
BAS	0.7710	0.036
BWO	0.7202	0.008

3.2 不同电压跌落场景的仿真结果

3.2.1 算例 1(电压跌落严重)

仿真结果如图 4 所示。 $t=0.1 s$ 时,电网发生严重的电压跌落 ($V^{+b}=0.52 pu, V^{-b}=0.12 pu$), $t=0.3 s$ 时电压恢复正常,波形图截取 $t=0\sim 0.4 s$ 的时段。由图 4a 和图 4b 可知,采用传统的逆变器控制策略在电网发生严重的电压跌落时电压支撑能力不足, V^+ 仅为 0.52 pu。0.1 s 切换为本文控制策略后 PCC 母线正序电压提升了 0.39 pu, 达到 0.91 pu。由于此场景下逆变器仅注入正序无功电流,故正序无功电压得到提升,负序无功电压 V^- 保持 0.12 pu 不变, PCC 母线三相电压维持在 0.85~1.10 倍额定电压以内,与理论分析一致,符合电网运行标准。由图 4c 和图 4d 可知,新能源场站输出的三相电流分别为 1.50 pu 和 1.16 pu, 满足在最大允许输出电流值 I_{lim} 以内,符合电流限幅的约束。



a. PCC 母线三相电压

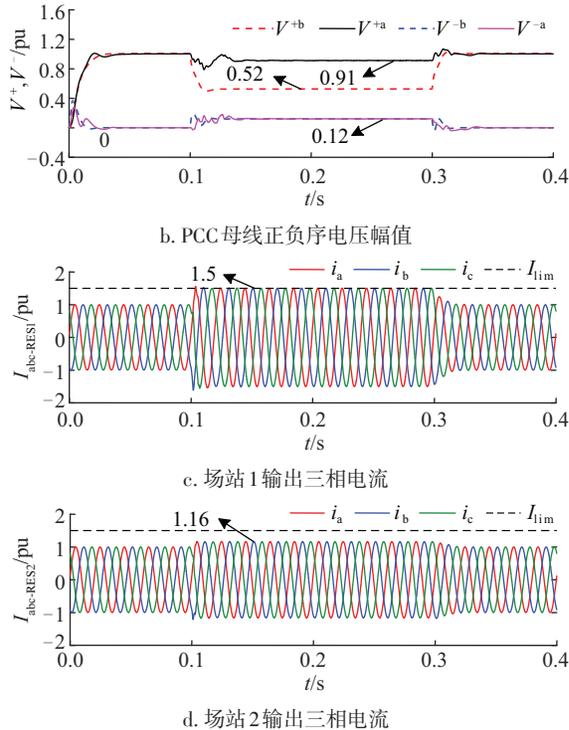


图4 算例1下新能源场站的输出特性
Fig. 4 Output characteristics of new energy stations under scenario 1

3.2.2 算例2(电压跌落不严重)

仿真结果如图5所示。 $t=0.1$ s时,电网侧发生不严重的电压跌落($V^{+b}=0.76$ pu, $V^{-b}=0.23$ pu), $t=0.3$ s时电压恢复正常,波形图同样截取 $t=0\sim 0.4$ s的时段。由图5a和图5b可知,控制策略由原来的恒功率控制策略切换为本文的控制策略后,正序电压从0.74 pu提升至0.90 pu。由于该场景下逆变器有一定容量剩余,在提升正序电压 V^+ 的同时通过注入负序无功电流对不平衡度进行改善,负序电压 V^- 由0.24 pu降至0.16 pu,PCC母线的三相电压维持在0.85~1.10 pu之间,从而实现了电压支撑的控制目标。由图5c和图5d可知,各新能源场站输出的三相电流同样在最大允许输出电流值 I_{lim} 以内,确保逆变器的安全运行,符合电流限幅的约束。

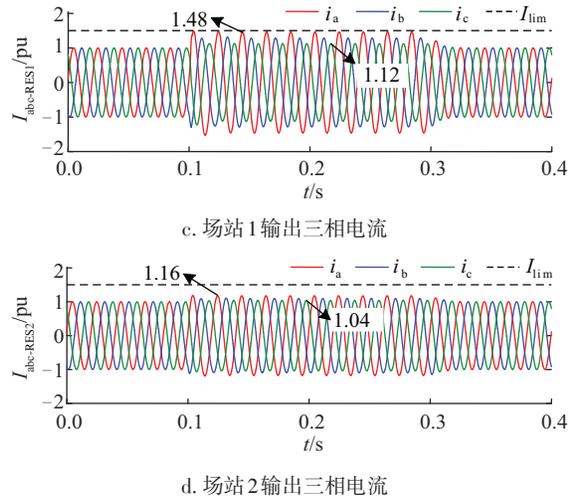
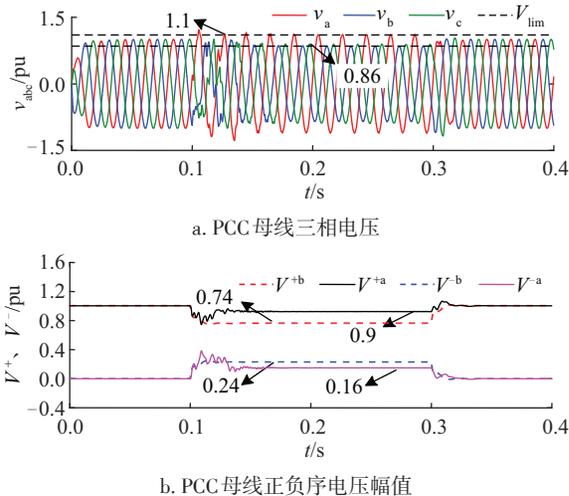


图5 算例2下新能源场站的输出特性
Fig. 5 Output characteristics of new energy stations under scenario 2

为验证削减有功振荡的效果, $t=0.1\sim 0.2$ s和 $t=0.2\sim 0.3$ s控制系统分别采用PQ控制策略和本文控制策略,从图6可看出有功振荡幅值由原来的0.16 pu降至0.08 pu,与理论分析结果一致。

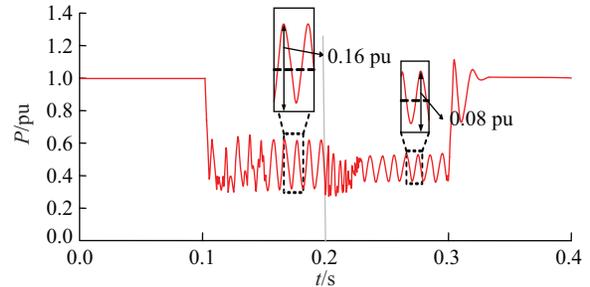


图6 新能源场站有功输出

Fig. 6 Active power output of new energy stations

4 结论

针对新能源场站在电网发生不对称故障时会出现电压跌落不平衡、电流越限等问题,本文提出一种不对称故障下新能源场站间主动电压支撑协调控制策略,可有效提升并网点电压水平,具体结论如下:

1) 所提出的无功协调控制策略以提升并网点电压为目标,以逆变器电流限幅和相电压幅值不越限为约束条件,使其能最大限度地利用逆变器容量支撑并网点的正序电压,同时降低负序电压,以改善电压的不平衡度。

2) 利用电压跌落场景区分的方法,引入BWO算法实现对新能源场站功率的优化配置,通过对不同电压跌落场景的算例进行研究,仿真结果验证在不同场景下都能使并网点电压提升至0.85 pu,达到低电压穿越的要求。

【参考文献】

- [1] 隋欣, 魏毅, 罗小林, 等. 面向“双碳”目标的脆弱区域生态光伏模式研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 56-63.
SUI X, WEI Y, LUO X L, et al. Emergence of a new pattern of ecological solar photovoltaics (ECO-PV) in ecologically fragile areas driven by carbon peak and neutrality targets in China[J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(7): 56-63.
- [2] 王祺, 秦文萍, 张宇, 等. 不平衡工况下新能源并网变换器韧性分析及优化控制[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4337-4346.
WANG Q, QIN W P, ZHANG Y, et al. Toughness analysis and optimal control of renewable energy grid-connected converters under unbalanced voltage condition [J]. Power system technology, 2020, 44(11): 4337-4346.
- [3] 王京保, 李辉, 张娟. 电网电压不平衡时光伏并网逆变器低电压穿越技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 111-116.
WANG J B, LI H, ZHANG J. Research on low-voltage ride-through of grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced grid voltage conditions [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(11): 111-116.
- [4] 郭小强, 刘文钊, 王宝诚, 等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5155-5162.
GUO X Q, LIU W Z, WANG B C, et al. Fault ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5155-5162.
- [5] CASTILLA M, MIRET J, CAMACHO A, et al. Coordinated reactive power control for static synchronous compensators under unbalanced voltage sags [C]//2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou, China, 2012: 987-992.
- [6] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
SUN H D, XU S Y, XU T, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-506.
- [7] 郭文明, 牟龙华. 考虑灵活控制策略及电流限幅的逆变器分布式电源故障模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6359-6367.
GUO W M, MU L H. Fault model of inverter-based distributed generator considering flexible control strategy and current limitation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6359-6367.
- [8] GUO W M, MU L H, ZHANG X. Fault models of inverter-interfaced distributed generators within a low-voltage microgrid [J]. IEEE transactions on power delivery, 2017, 32(1): 453-461.
- [9] 张冶, 蔡颖凯, 曹世龙, 等. 多逆变器并联系统输出电压不平衡度补偿策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(6): 95-98, 103.
ZHANG Y, CAI Y K, CAO S L, et al. A strategy of voltage unbalance degree compensation strategy of multi-inverter parallel system [J]. Power electronics, 2021, 55(6): 95-98, 103.
- [10] CHEN H C, LEE C T, CHENG P T, et al. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters with reduced power transistors stress [J]. IEEE transactions on power electronics, 2016, 31(12): 8562-8571.
- [11] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults [J]. IEEE transactions on power electronics, 2014, 29(11): 6224-6234.
- [12] ALTIN M, GÖKSU Ö, TEODORESCU R, et al. Overview of recent grid codes for wind power integration [C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania, 2010: 1152-1160.
- [13] ZHONG C T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: a novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J]. Knowledge-based systems, 2022, 251: 109215.
- [14] 刘新东, 郭容, 张建芬, 等. 计及风力发电的配电网电压稳定性评估框架研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 77-81.
LIU X D, GUO R, ZHANG J F, et al. Voltage stability assessment frame for distribution network with wind farms [J]. Power system protection and control, 2013, 41(17): 77-81.

ACTIVE VOLTAGE SUPPORT COORDINATION CONTROL STRATEGY BETWEEN NEW ENERGY FIELD STATIONS UNDER FAILURE

Wang Yezhengwu¹, Ji Liang¹, Chang Xiao², Fan Rui², Li Huipeng², Hong Qiteng³

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China;

3. University of Strathclyde, Glasgow G11EX, UK)

Abstract: To address the operational risks such as voltage dips and current crossing limits that may occur in inverter-type new energy field stations when asymmetric faults occur in the grid, this paper proposes an inter-station coordination control strategy for voltage dip scenarios, which can effectively realize the active voltage support of multiple new energy sites to the Point of Common Coupling (PCC) under fault. Firstly, based on the output characteristics of the inverter control system, the voltage support principle under asymmetric fault is analyzed. Secondly, in order to solve the configuration problem of the output current among the new energy sites, Beluga Whale Optimization (BWO) algorithm is introduced to optimize the power of the sites, and the corresponding reference current is derived on this basis. Finally, the voltage dip scenarios are distinguished, and different reference currents are injected by the inverters in the respective scenarios to realize multiple control objectives such as voltage support, current limiting, and improvement of unbalance at the parallel network. The grid-connected operation system with inverter-based new energy field stations is built in Matlab/Simulink simulation platform, and the system simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: new energy; voltage support; unbalance degree; coordinate control strategy; power optimization; scene differentiation