

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.04.003

三级式风电 AVC 协调控制策略

Three-level wind power AVC coordinated control strategy

陈逸琿¹, 林令淇², 田鑫², 张栋梁², 吴军¹, 刘子晨¹

CHEN Yihui¹, LIN Lingqi², TIAN Xin², ZHANG Dongliang², WU Jun¹, LIU Zichen¹

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 电力规划设计总院, 北京 100120)

(1.School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2.China Electric Power Planning Engineering Institute, Beijing 100120, China)

摘要:近年来,我国新能源技术迅猛发展,其中风电并网发电量增长迅速。但风电的接入往往采取大规模集群式并网的方式,导致电压不稳定问题突出、风电并网点电压越限问题严重。自动电压控制(AVC)系统是电网无功电压管理的重要技术手段,对电网实现经济稳定运行有重要意义。基于目前电网中风电大规模接入的情况,提出了风电参与下的电网 AVC 系统改进控制策略,即基于分级式控制结构,建立三级式风电 AVC 系统协调控制策略,以风电汇集站作为中间协调层,在协调层进行控制决策,并通过罚函数处理的方式将多机组非线性无功优化问题变为无功分配极值问题,最后,结合提出的改进和声搜索算法寻求无功的最优解。该策略可以确保 AVC 系统控制下电网的经济稳定运行。

关键词:风电;自动电压控制系统;电压控制策略;非线性无功优化;仿真模型;新能源

中图分类号:TK 83 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)04-0020-08

Abstract: In recent years, China's new energy technology has developed rapidly. Among them, power generated by grid-connected wind farms has grown rapidly. However, wind power accesses to the grid in a way of large-scale wind farm cluster, which leads to severe voltage instability and voltage over-limit at wind power grid-connected points. Automatic voltage control (AVC) system is an important technical means for reactive power voltage management, and is of great significance to the economic and stable operation of the power grid. Based on the current situation that large-scale wind power has connected to the power grid, an improved control strategy for the AVC system with wind power participation is proposed. It is a three-level wind power AVC system coordinated control strategy constructed based on a hierarchical control structure, with wind power collection stations as the intermediate co-ordination layer. The control decision is made on this layer by converting multi-unit nonlinear reactive power optimization to reactive power extreme value distribution through penalty function process. Finally, the optimal solution of reactive power is found through the proposed improved harmony search algorithm. The strategy can ensure the economic and stable operation of the power grid under the control of the AVC system.

Keywords: wind power; AVC system; voltage control strategy; nonlinear reactive power optimization; simulation model; new energy

0 引言

随着新能源技术的不断发展以及以新能源为主体的新型电力系统的加速构建,国内各类新能源的发电量都在迅速增长,风电产业走在各类能源发展前列^[1]。由于风电场往往远离负荷中心,基本处于我国西南、西北地区,所以风电场大规模集群式并网发电难以获得有效的无功支撑,电压不稳定的

问题时有发生;另外,由于风速的波动性较大,导致系统接入的风功率连续变化,容易引起风电并网点电压的越限。

因此,在进行风电无功电压控制研究时,为了应对风力发电的特点,需要充分考虑网架中各节点允许的最大电压耐受值,即电压可能存在的越限问题。自动电压控制(Automatic Voltage Control, AVC)是电网无功电压管理的重要技术手段,已在我国电力系统中得到广泛应用,但其在新能源参与下的电网中的应用尚在发展阶段^[2-3]。

关于大规模风电参与电网AVC系统协调控制的问题,目前已有部分研究成果。文献[4]研究分析了智能算法在大规模集群新能源并网情况下对电压无功进行优化的可行性,并通过分析风电接入AVC系统后系统的稳定性指标,建立了风电参与AVC的网络模型。文献[5]基于无功补偿装置的补偿特性,对其在AVC系统中的协调控制作用进行了研究。文献[6]总结了风电场在场级规模下的各种电压自动控制优化算法,并基于风功率特性建立了风功率模型,同时对无功补偿装置与风机之间的相互配合进行了研究。文献[7-8]基于无功源(包括风机和无功补偿装置),针对风电集群协调控制在无功电压控制与电网安全稳定控制应具备的基本功能,提出了对大规模风电场集群并网进行分层、分区控制的思路。上述文献大多是从风电场自身,即一个单一发电场出发,考虑风机与无功补偿装置相互配合来满足上级AVC主站下发的调度命令;也有一些研究从上下级的配合(比如省、地协调控制)出发,探究AVC系统的优化控制模式。但是在这些研究中,实际大规模风电并网时,下级风电场AVC子站不能对风功率变化引起的电压波动进行及时跟踪,电压短时越限后电网不能及时反应,控制延时导致电压失稳,从而使上级AVC主站无法很好与之配合的问题。

为解决上述问题,本文从大规模风电接入电网的特殊结构入手。考虑到风电汇集站在集群风电场中的枢纽作用,本文提出了基于分级式控制结构的三级式风电AVC系统协调控制策略。在该策略中,风电汇集控制站起到中间层作用,对上接收电网调度中心下达的控制指令,对下通过实时优化进行决策,对其控制范围内的AVC子站下达优化控制指令,形成AVC主站-风电汇集站-风电AVC子站的3层协调控制模式,缩短了上下级之间的反应距离,加快了响应速度。其中,无功优化计算的算法根据实际风电接入的特性,采用了改进的和声搜索(Harmony Search, HS)算法来实现优化计算。

1 AVC系统

1.1 传统AVC系统

传统AVC系统在我国电力系统中的应用已经相对成熟,它能通过调节电网中的无功电压设备优化电网无功潮流,在保证电压合格的基础上实现网损的降低^[9]。

传统AVC系统中,AVC主站部署于电网调度中心,以电网运行网损最小为优化目标,计算电网中各个节点处的最佳无功功率补偿量,并将各个场站

需要输出的无功功率直接下发给AVC子站;发电站AVC系统属于AVC子站系统,它以母线电压合格率最高、发电机无功出力最优、网损最低等要求为目标进行电压无功闭环控制。电力系统中无功电压控制最基本的方法是九区图控制策略,它利用实时监测的无功和电压2个判别量对AVC子站的电压和无功进行综合判定并调节,稳定地将电压保持在正常变化范围内,达到控制区域内无功平衡的效果。

但在风电大规模接入的情况下,由于风电波动性等特性,无论是电压还是无功,越限的情况都会大量增加^[10],而且往往是短时间内反复在界限两边波动,对越限的判定速度和系统的反应速度都提出了更高的要求,此时的AVC系统已经不能再完全使用传统的协调控制策略来应对了,需采用更适用于风电参与的AVC系统控制策略。

1.2 风电参与的AVC系统

在国内的大多数风电场中,运用最广泛的具有无功调节能力的发电机是双馈风力发电机(DFIG),其结构示意图如图1所示^[11]。

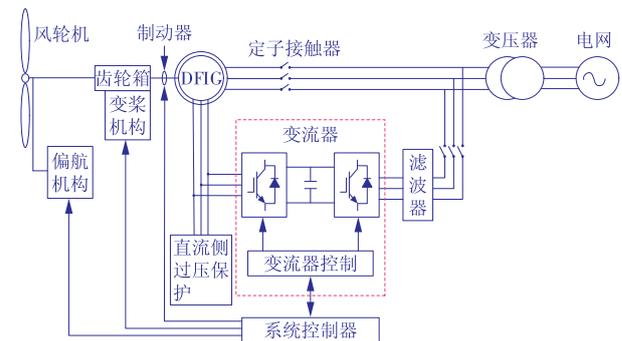


图1 双馈风力发电机结构

Fig. 1 Structure of a double-fed wind generator

在该结构中,DFIG通过对变流器进行控制实现有功和无功的解耦,使得风机自身具有了动态调节无功的能力,这是风机作为无功源参与并网电压调节的基础。

在大规模风电系统中,并网点电压以及风机端电压的主要特点包括:(1)在出力相同的情况下,风机距离并网点越远,电压值越高,所以当风机出力较大时,会导致各风机间产生较大的电压差;(2)风机距离升压变电站的距离直接影响了风机与电网的关联性,当风机出力发生变化时,距离较远的风机机端电压受到的影响也较大;(3)在总负荷确定的情况下,各个风机发出的有功功率并不相同,出力差额会随着风电场负荷的增加而减小。

对于风电接入的AVC系统而言,传统的方法是从调度中心AVC主站的角度,将每个风电AVC子站等效为一台无功在一定范围内可调的发电机,而不

具体考虑电场内的无功配置,这样可以将风电场与常规电站并行处理,进行整体优化^[12-13]。但在 AVC 系统运行时,考虑到传统能源的发电特性,即下级电站往往处于未发状态且后备充足,所以通常只考虑了上级主站对下级子站的命令与控制,即假定下级子站一定能补足无功差额,下级只需要反馈自己的运行状态是否达到要求,而未考虑下级子站运行状态对上级主站的影响。在风电接入导致越限情况频繁的情况下,传统方法不能很好地进行电压的协调控制。因此,不能简单地将新能源电站等效为常规电站接入电网 AVC 系统进行协调控制。考虑到风电有别于常规电源的特点,在大规模风电接入电网的情况下,下级 AVC 子站不能只单纯接收上级下发的指令并传递状态,而应该实现双向的信息互动。但不难得出,在双向信息互动的过程中,虽然实时的反馈能加强电网整体的协调性,提升风电参与下 AVC 系统的反应灵敏度;但是不断的下发、上送信息会产生额外的反应时间,这对抑制新能源接入带来的波动性又产生了反作用,两者之间的相互冲突使最终的协调控制效果很难预测。基于此,本文从信息处理与传送速度的角度入手,对风电 AVC 系统的运作流程提出了改进策略。

2 控制策略流程

2.1 控制策略

由文献[14]可知,风电等新能源电站典型的一次接线采用两级升压方式:风机发出的电能经风机内部的变流器转换为工频交流电之后,由就地的一级升压变压器升高到 10 kV 或 35 kV;再经汇集母线汇集到变电站后,由二级升压变压器(即主变压器)升高到 110 kV 或 220 kV,然后投送到大电网中。

此过程可将风电汇集变电站并网点电压或包含各风电场的区域电网电压作为无功电压协调控制的主要研究对象,并辅以经济性指标,将风电汇集变电站的母线作为调节电压的中枢母线,收集区域内风电场无功配置等信息,对风电场集群并网点处的无功电压进行协调控制。风电汇集站在此过程中可起到汇集区域内各风电场母线信息、快速响应本区域内 AVC 子站信息并进行优化控制的作用。

考虑到汇集站在大规模风电集群接入中的特殊地位,本文提出了基于分级式控制结构的三级式风电 AVC 系统协调控制策略。在该策略中,第 1 级为 AVC 主站,部署在电网调度中心并下达调度控制指令;第 2 级为风电汇集控制站,在中间层起到协调枢纽作用;第 3 级为 AVC 子站,接受汇集站优化控制指令,并使区域内风机执行调度要求。在考虑 AVC

协调站的加入后,整体的双向互动过程为:(1)以 AVC 主站为电网调度控制中心,以实现全网协调为目标,向各无功电压控制分区(即各汇集站)、常规电站下发中枢节点电压控制参考值 U_{ref} ,综合上送的实时运行状况,下达控制指令;(2)风电汇集站以实现本风电集群区域内的协调控制为目标,对场群内的各风电场风机进行分区以及无功优化计算,并向各风电场 AVC 子站下发无功调节设备无功功率控制参考值 Q_{ref}^{sp} 和并网点电压控制参考值 U_{ref}^{pcc} ; (3)控制风电 AVC 子站控制站内的无功调节设备(包括无功补偿装置以及风机),子站控制站完成对汇集站所下发的控制参考值的跟踪,并上送本地信息给汇集站,若命令未能实现,则由汇集站再次进行优化计算,并将命令重新下发给 AVC 子站;(4)调度中心根据风电汇集站及常规 AVC 子站上送的信息对整体电网进行调整。

2.2 控制流程

为实现以上 AVC 系统的双向信息交流,本文所提出的三级式风电 AVC 系统无功电压协调控制策略,控制流程如图 2 所示(其中 ΔU_1 为电压偏移值)。

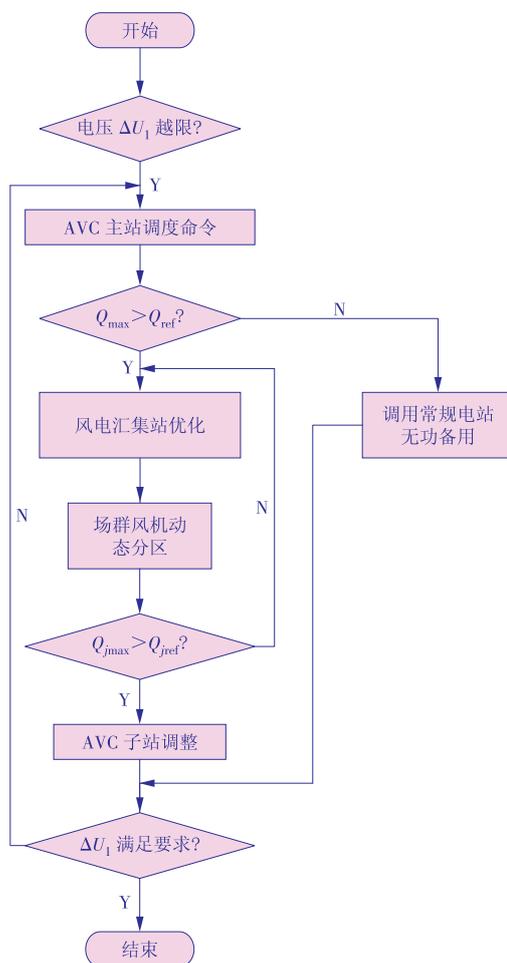


图 2 控制策略流程

Fig. 2 Flow of the control strategy

(1) 风电汇集站AVC接收电网调度指令。AVC主站根据收集到的各风电场群中枢母线信息确定风电场群是否需要无功电压控制。若汇集站中枢点或区域内接入点电压越限,需要进行无功控制,则执行下一步;若不需要进行控制,则以有功网损最小作为目标直接进行优化计算。

(2) 计算风电场群无功电压调节所需的无功调节量。当前风电场群的总无功出力参考值

$$Q_{\text{ref}} = (U_g - U_{\text{ref}}) I_g \cos \varphi_g \tan \varphi_{\text{ref}}, \quad (1)$$

式中: φ_{ref} 为公共连接点功率因数角的参考值; $U_g, I_g, \cos \varphi_g$ 分别为中枢点电压、电流、功率因数的测量值。

需要注意的是,在本区域内有常规(水电、火电)电站时,由于常规电站无功补偿过程相对容易、补偿速度相对较快、补偿容量相对较大,其参与系统无功补偿的优先级是高于风电的。

(3) 采集各风场内风机、无功补偿设备的信号。汇集站确定本区域内各风电场无功功率的调节范围,设定各单场无功裕度大小,并收集各单场无功功率的可发出量等信息。

各单场应发出的无功功率

$$\begin{cases} Q_j = \frac{Q_{\text{ref}}(Q_{i_{\text{max}}} - Q_{j_{\text{yd}}} + Q_{j_{\text{Bmax}}})}{\sum_{i=1}^n (Q_{i_{\text{max}}} - Q_{j_{\text{yd}}} + Q_{j_{\text{Bmax}}})} Q_{\text{ref}} < \sum_{i=1}^n Q_{i_{\text{max}}} + Q_{j_{\text{Bmax}}} \\ Q_j = Q_{i_{\text{max}}} - Q_{j_{\text{yd}}} + Q_{j_{\text{Bmax}}} & Q_{\text{ref}} \geq \sum_{i=1}^n Q_{i_{\text{max}}} + Q_{j_{\text{Bmax}}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: n 为风电场群中风机的数量; $Q_{i_{\text{max}}}$ 为第*i*台风机的最大无功备用; Q_j 为第*j*座风电场应发出的无功功率; $Q_{j_{\text{Bmax}}}$ 为第*j*座风电场补偿设备的最大可调无功功率; $Q_{j_{\text{yd}}}$ 为第*j*座风电场需保留的最低无功备用。

对单台风机而言,其无功可调整功率极限可由下式得到,

$$\begin{cases} Q_{\text{smax}} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{\text{rmax}}\right)^2 - \left(\frac{P_g}{1-s}\right)^2} \\ Q_{\text{smin}} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{\text{rmax}}\right)^2 - \left(\frac{P_g}{1-s}\right)^2} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q_{\text{cmax}} = \sqrt{S_n^2 - \left(\frac{sP_g}{1-s}\right)^2} \\ Q_{\text{cmin}} = -\sqrt{S_n^2 - \left(\frac{sP_g}{1-s}\right)^2} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} Q_{\text{gmax}} \approx Q_{\text{smax}} + Q_{\text{cmax}} \\ Q_{\text{gmin}} \approx Q_{\text{smin}} + Q_{\text{cmin}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{smax}}, Q_{\text{smin}}, Q_{\text{cmax}}, Q_{\text{cmin}}, Q_{\text{gmax}}, Q_{\text{gmin}}$ 分别为DFIG有功功率输出为 P_g 时,发电机定子可发无功功率、网侧变流器可发无功功率、DFIG可发无功功率的最

大值与最小值; U_s 为额定电压; I_{max} 为最大允许电流; S_n 为额定功率; P_g 为实际输出有功功率; X_s, X_m 分别为机端阻抗和励磁电抗; s 为转差率。风电场内无功补偿装置的可补偿容量一般由厂家设备信息直接提供。

(4) 在汇集站内对风电场内风机进行分区,并对该汇集区域进行潮流计算。

当风机接收的风速相近或相同时,它们的运行状况基本是相同的,也就可以认为风机的风功率是相同的。所以,可以简单地根据风速对风机进行动态分区。对风机进行分区的作用实际上是对风电场内的风功率进行分区,在一个分区内的风机风功率近似认为是相同的,这也就大大减少了潮流的计算量,加快了潮流计算的速度。

在对风机进行分区后,利用优化算法计算分配到各单场中各无功源的实际无功功率。将各单场的可发无功补偿功率与本场总无功功率需求进行比较,若前者大则执行下一步,否则将无功缺额上送至汇集站重新进行优化计算。

(5) 子站AVC将控制指令发到本场内各风机和无功补偿设备。一般为保证无功的快速可调以及电压的迅速反应,无功补偿装置应优先于风机而动作。无功补偿装置补偿容量不足时,风机则按灵敏度依次对无功进行补偿。

在本场子站AVC无功调节完成后,根据电压偏移值(ΔU_1)是否越限为主要指标,确定本次调整是否完成调度命令。

3 优化数学模型

3.1 模型转化

在策略流程中,当上级AVC主站下发命令至汇集站时,需在汇集站内进行无功的优化计算。由于风电场内众多设备的数学模型为非线性模型,因此此类无功优化问题属于非线性优化问题,而且是一个带约束的非线性最优化问题^[14]。

以风电汇集站中枢点电压即汇集站并网点电压偏移最小作为目标函数,其中包含的约束条件有

$$\begin{cases} P_{i, \text{min}} \leq P_i \leq P_{i, \text{max}} & i = 1, 2, \dots, N \\ Q_{Gi, \text{min}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \text{max}} & i \in S_G \\ T_{i, \text{min}} \leq T_i \leq T_{i, \text{max}} & i \in S_T \\ B_{i, \text{min}} \leq B_i \leq B_{i, \text{max}} & i \in S_B \end{cases}, \quad (6)$$

式中: P_i 为发电机有功; Q_{Gi} 为发电机无功; T_i 为发电机转矩; B_i 为磁感应强度。求解带约束的非线性最优化问题可采用通过惩罚函数(或称罚函数)处理的方法,将带约束条件的非线性问题经过处理,转变为一系列无约束的非线性极值问题,从而使求解

过程简单化。

假设要计算的优化问题的数学模型为

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_j(x) \geq 0 & j = 1, 2, \dots, m, \\ h_i(x) = 0 & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f(x)$ 为优化问题的目标函数; $g_j(x) \geq 0$ 为优化问题的不等式约束条件; $h_i(x) = 0$ 为优化问题的等式约束条件; m 和 n 分别为 j 和 i 所能取到的最大值。

罚函数的内点法是一种在可行域 s 内部搜索最优点的罚函数法。结合新能源电场无功优化计算的实际情况, 本文采用一种内点法对问题进行处理,

$$G(x, \gamma_k) = f(x) + \gamma_k \sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j(x)} + \frac{1}{\sqrt{\gamma_k}} \sum_{i=1}^n [h_i(x)]^2, \quad (8)$$

式中: γ_k 为一个很小的正数, 称为障碍因子, 其值随迭代过程严格递减且趋近于 0。

通过上述数学模型并考虑到经济性指标, 式(8)中目标函数显然为并网点电压偏移; 等式约束条件为包括汇集站及其下属风电场在内的风电区域的总无功调节量要等于总无功需求量, 表示为分配给风机和无功补偿装置的无功之和要等于总的无功缺额; 不等式约束条件为汇集区域内总的有功网损限值, 表示为各风电场网损要小于允许的最大网损率。由此建立的目标函数数学模型为

$$G(x) = f(x) + \gamma \sum_{j=1}^m \frac{1}{L_{P_j}} + \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{wi} - Q_{gi}) + Q_{ib} \right]^2, \quad (9)$$

式中: Q_{wi} 为第 i 台风机的无功出力参考值; Q_{gi} 为第 i 台风机的最大可用无功; Q_{ib} 为风电集群总的动态无功补偿装置补偿量; L_{P_j} 是一个与网损率相关的函数。 L_{P_j} 的表达式为

$$L_{P_j} = N_p - \frac{\Delta P_j}{P_j} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: P_j 为第 j 座风电场的实际上网功率; ΔP_j 为第 j 座风电场的并网有功损耗; N_p 为 AVC 系统允许的风电场电网网损率, 一般为 3.0%~7.5%, 本文取 3.0%。

本文只考虑风电区域内机组、无功补偿装置等无功出力变化带来的损耗变化, 其余损耗视为定值。

3.2 损耗指标设置

在电力系统中, 最常用的表征系统经济性的指标就是系统的网损率, 对于 AVC 系统而言, 其重要的任务之一也是保证系统的经济运行。

本文旨在提升电网对风电的消纳能力, 平衡大规模风电接入电网时 AVC 系统的经济性与电压稳定性。本文将单位发电量电压变化率 W 作为所提

策略的经济性指标, 其含义为控制风电区域实际发出每单位有功功率时电压的偏移量, 该值越小表示控制效果越好, W_t 为某一采样时刻的 W 值,

$$\begin{cases} W = \frac{\sum_{t=1}^a \frac{\Delta U_{it}}{P_t - \Delta P_t}}{a + 1}, \\ W_t = \frac{\Delta U_{it}}{P_t - \Delta P_t} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ΔU_{it} 为 t 时刻汇集站并网点越限电压偏移量, 取绝对值; a 为总测量时间内的测量次数; P_t 为第 t 座风电场的实际上网功率。

可以看出, 在电压偏移近似相等的情况下, 电网网损越小, W 值越小, 即控制损耗越小, 系统经济性相对较好。在本研究中, W 值仅作为衡量不同控制手段损耗的经济性指标, 而不作为控制的目标量。

3.3 优化计算

由建立的无功优化数学模型可知, 本文要求解的是一个含有多个约束条件的非线性最优化问题。

HS 算法作为一种人工智能算法, 具有控制参数少、鲁棒性能好、寻优策略简单、易于实现等优点, 且对于离散变量的优化问题有较好的寻优效果。

与一般人工智能算法类似, 和声搜索算法主要包括以下参数: (1) 和声记忆库的大小 (HMS), 对应电压偏移的一系列约束限值, 包括有功限值、无功限值、风机转矩及导纳等, 即优化的搜索域。初始解必须满足在此范围内; (2) 学习和和声库的概率 (HMCR), 以此概率在搜索域搜寻使得目标 $G(x, \gamma_k)$ 最小的最优点, 即系统的最优无功分配; (3) 调整率 (PAR), 搜索过程中的迭代修正系数; (4) 调整距离带宽 (BW), 搜索间隔; (5) 迭代的次数。

在风电的无功优化问题中, 首先根据式(9)确定算法的最小化问题, 即搜索凭借的目标函数。其次, 算法产生 M 个 $G(x, \gamma_k)$ 的初始解, 将其放入和声记忆库内, 确定学习和和声库的概率、调整率、调整距离带宽、迭代次数等初始参数, γ_k 随迭代过程的进行会由调整率调整不断递减, 而以概率 HMCR 在 HM 内搜索 $G(x)$ 的新更优解, 并代替初始解, 继续迭代过程。

由于使用罚函数对目标函数进行了处理, 可能使算法在初期搜索时偏离可行的搜索域, 或在搜索域边界进行搜索。所以为提高算法的寻优速度、减少迭代次数, 本文对算法中的寻优搜索概率 HMCR 值提出了采用线性递减的改进方式, 即

$$H = H_{\min} + t \left(\frac{H_{\max} - H_{\min}}{T} \right), \quad (12)$$

式中: H_{\min} 为迭代至最大迭代次数时的搜索概率; H_{\max} 为初始搜索概率; t 为当前的迭代次数; T 为最大的迭代次数。

在改进搜索概率的变化之后,算法在运算初期具有较强的搜索能力,而在后期搜索域缩小的情况下又能够加快搜索速度,使结果更易收敛,从而提高了算法的性能。

在 Matlab 软件中,使用标准 39 节点风电仿真模型对优化算法进行比较。对比不同时刻优化算法的迭代过程,对优化算法的改进后,平均迭代次数在 450 左右时结果已收敛,而改进前所需要的迭代次数在 550 左右,可以确定对优化算法的改进能加快迭代速度。

4 算例分析

以云南地区的某小型风电场群为例,获取当地各发电场的数据,通过 PSD-BPA 仿真软件仿真分析验证所提控制策略的可行性。

该风电场群位于地区电网末端,共接入 5 座风电场,考虑到新能源发电常常与常规电站协同进行区域调峰调压,所以在本仿真模型中,在电网末端并行接入水电站,汇集变电站与水电站并行接入电网。区域电网接线结构如图 3 所示。

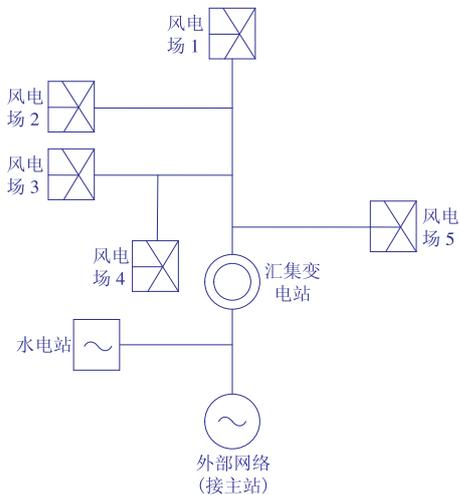


图 3 风电场群电网接线示意

Fig. 3 Schematic grid connection for wind farms

假设各电站与节点的距离相同,即不考虑距离对无功的影响。所有风机均为 1.5 MW 的 DFIG,风电场集群总装机容量为 975.0 MW,水电站装机容量为 100.0 MW,5 个风电场接入 220 kV 汇集站后集中并入外部电网,风电场集群并网点参考电压标幺值为 1.00,要求控制电压标幺值波动范围为 0.97 ~ 1.03。DFIG 运行时内部各参数值见表 1。

表 2 统计了各风电场装机规模及无功补偿装置

容量,同时并行的水电站无功补偿容量为 30 MV·A。

表 1 DFIG 参数

Table 1 Parameters of the DFIG

参数	数值
额定电压/V	690
定子电阻(标幺值)	0.008 4
定子漏抗(标幺值)	0.124 8
转子电阻(标幺值)	0.008 3
转子漏抗(标幺值)	0.088 4
励磁电抗(标幺值)	1.836 5
额定功率/MW	1.5
阻抗基值(标幺值)	0.563

表 2 风电场群装机规模

Table 2 Installed capacity of the wind farms

风电场	装机容量/MW	动态无功补偿装置容量/(MV·A)
1	150.0	20
2	225.0	20
3	300.0	20
4	120.0	20
5	180.0	20

在仿真模拟中,假设夜间风机接收风速最大,白天风机接收的风速最小,最大风速不超过 22 m/s。全天风速在此范围内随机波动。所模拟的全天汇集站区域风速变化如图 4 所示,测量间隔为 4 min。

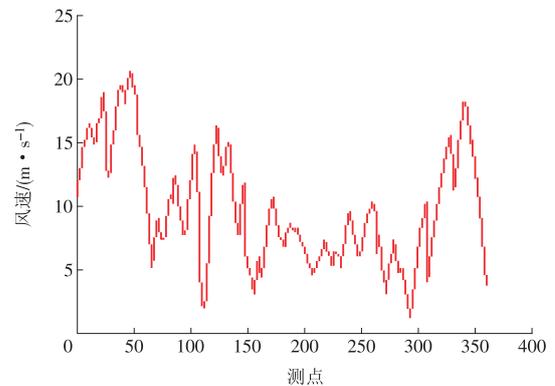


图 4 全天模拟风速变化

Fig. 4 Simulation of the wind speed throughout a day

为比较不同控制策略和优化算法对风电场群电压的调节效果和优化效果的影响,本节采用以下 2 种控制方式进行对比。

方式 1:使用本研究所提出的三级式风电 AVC 系统协调控制策略,以风电场群汇集站并网点电压偏差最小为控制目标,得到风电场集群的无功任务后,对区域内风机进行动态分区,对风机进行无功任务分配,改进优化算法参数设置见表 3。

方式 2:使用传统 AVC 调度控制手段,直接以主站 AVC 调度命令对子站进行控制,在无功补偿装置

表 3 方式 1 改进优化算法参数

Table 3 Improved optimization algorithm parameters of way 1

参数	数值
搜索库大小	80
搜索概率	0.7~0.9
扰动调整率	0.05
迭代次数	500

满发后按风机无功出力灵敏度进行无功任务分配。

仿真试验以有功功率的突增模拟新能源接入时新能源传输功率的改变,具体操作就是在汇集站一条母线设置励磁电压修改 LS 卡,模拟发电机功率变化,分别测试使用 2 种方式时,汇集站的并网点电压变化情况。仿真结果如图 5 所示。

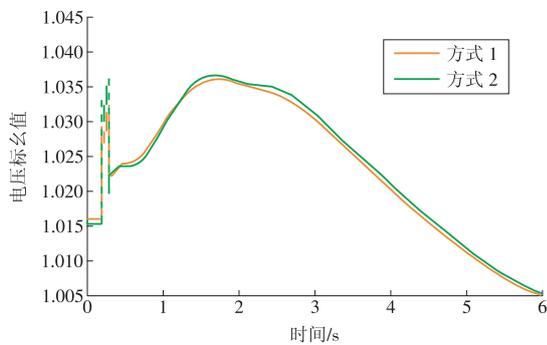


图 5 不同控制方式下并网点电压变化

Fig. 5 Voltage at the grid connection point under different control methods

从上图可以看出,采用所提的控制策略时,可以有效地减小电压的波动,对电压波动的反应更加迅速。风电场群汇集站并网点电压会随着风速的不断改变而改变。所得的不同控制策略情况下,风电场群汇集站并网点电压在一天内波动曲线如图 6 所示,测量间隔为 10 min。

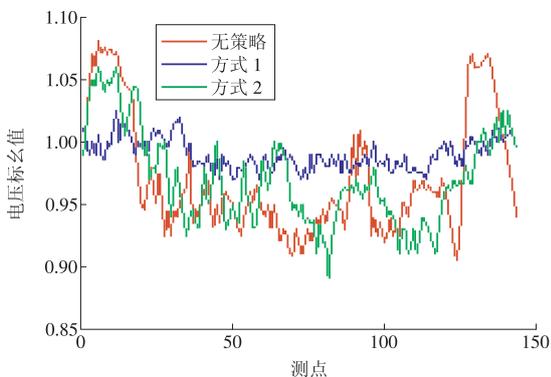


图 6 全天不同控制方式下电压波动曲线

Fig. 6 Voltage fluctuation curve under different control methods in one day

风电场群 W_i 值会根据一天内风速变化而变化,所以本文取其一天内的平均值,对不同控制方式的结果进行比较。部分时刻的统计数据见表 4。

表 4 部分时刻 W_i 值统计

Table 4 Statistics of the value of W_i at certain moments

时刻	W_i		
	无策略	方式 1	方式 2
15:10	0.799 095 023	0.199 095 023	0.530 920 060
15:20	0.995 475 113	0.265 460 030	0.398 190 045
15:30	0.796 380 090	0.199 095 023	0.265 460 030
15:40	0.995 475 113	0.132 730 015	0.530 920 060
15:50	0.862 745 098	0.265 460 030	0.663 650 075
16:00	1.061 840 121	0.132 730 015	0.597 285 068

根据全天的统计数据,采取无策略、方式 1、方式 2 的平均 W_i 值分别为 0.707%,0.186%,0.548%。

从图 6 和表 4 可以看出,采用传统 AVC 协调控制方式可以在有功出力波动时减小电压的波动幅值,并在长时间电压越限的状态下做出良好的反应,但短时间内不能将电压控制在合理范围之内,也无法快速地对电压波动进行响应,经济性指标有所提升;而采用本研究所提出的基于分级式控制结构的三级式风电 AVC 系统协调控制策略则能在降低电压波动幅值的基础上使电压更快趋于稳定,在风速波动致使有功出力改变时,保持电压稳定,使得电压合格率在很大程度上得到提升,同时,经济性指标有了大幅提升,使得整个风电区域的经济性得到了极大的提高。

5 结论

分级式的 AVC 系统控制结构可以加强电网各级之间的互联,尤其能够增强上级主站对下级子站反馈的响应。本文所述的三级式风电 AVC 协调控制策略为一种将风电场群中的汇集站作为中间协调层的三级控制模式,缩短了上下级之间的响应距离,并在响应中间层,即汇集站层,利用罚函数处理模型,再通过改进的和声搜索算法对风电区域内的无功配置进行优化计算,达到电压稳定与经济性之间平衡的效果。

在设置的仿真算例中,采用一个含 5 个风电场与 1 个水电厂的小型集群系统对本文所提出的优化策略进行仿真。结果表明,该控制策略能够在 AVC 系统中提高系统对功率变动的响应速度,并且提高了风功率波动情况下的电压稳定性与系统经济性。

参考文献:

[1]孙勇,魏敏,王磊,等.基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):107-112.

- SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(19):107-112.
- [2]李世群,宋巍,郭飞,等.变电站SVG接入AVC系统控制策略及改进应用[J].电气工程学报,2017,12(10):45-50. LI Shiqun, SONG Wei, GUO Fei, et al. Control strategy and improved application of substation SVG in AVC system [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017,12(10):45-50.
- [3]卞阳,赵奇剑,胡水军,等.基于云平台的智能配电网电能质量监测预警研究与应用[J].华电技术,2021,43(1):31-37. BIAN Yang, ZHAO Qijian, HU Shuijun, et al. Research and application on power quality monitoring and warning of intelligent power distribution network based on cloud platform[J]. Huadian Technology, 2021,43(1):31-37.
- [3]孙卓新,朱永强,倪一峰,等.基于粒子群算法的含光伏电站的配电网无功优化[J].电力建设,2014,35(4):25-30. SUN Zhuoxin, ZHU Yongqiang, NI Yifeng, et al. Reactive power optimization of distribution network with photovoltaic power station based on particle swarm optimization [J]. Electric Power Construction, 2014,35(4):25-30.
- [4]刘其辉,赵亚男,毛未.分散式风电AVC策略[J].电力自动化设备,2017,37(8):201-207. LIU Qihui, ZHAO Yanan, MAO Wei. AVC strategy for distributed wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(8):201-207.
- [5]彭飞进,李绥荣,李响,等.考虑SVG的地区AVC系统协调控制方法的分析[J].自动化与仪器仪表,2017(4):20-21,24. PENG Feijin, LI Suirong, LI Xiang, et al. Analysis of SVG's coordinated control method for regional AVC system [J]. Automation and Instrumentation, 2017(4):20-21,24.
- [6]徐丹.风电场AVC控制策略及算法研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [7]李朝阳,王维庆,常喜强,等.基于风电汇集地区无功源优化控制技术研究[J].电力电容器与无功补偿,2016(6):95-99,104. LI Chaoyang, WANG Weiqing, CHANG Xiqiang, et al. Study on reactive power optimization control technology at wind power collection area [J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2016(6):95-99,104.
- [8]彭世康,马红伟,曹立伟,等.基于动态响应参数的新能源发电AVC系统[J].电网技术,2019,43(9):3328-3336.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1361. PENG Shikang, MA Hongwei, CAO Liwei, et al. AVC system of new energy power station based on dynamic response parameters [J]. Grid Technology, 2019,43(9):3328-3336.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1361.
- [9]杨明,罗隆福.计及风电与负荷不确定性的电力系统无功随机优化调度[J].电力系统保护与控制,2020,48(19):134-141. YANG Ming, LUO Longfu. Stochastic optimal reactive power dispatch in a power system considering wind power and load uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(19):134-141.
- [10]刘军,汪继勇.基于风电机组健康状态的风电场功率分配研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):106-113. LIU Jun, WANG Jiyong. Research on power distribution of a wind farm based on the healthy state of wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(20):106-113.
- [11]NOWAK S, WANG L W, METCALFE M S. Two-level centralized and local voltage control in distribution systems mitigating effects of highly intermittent renewable generation [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020,119:288-302.
- [12]李生虎,章怡帆,于新钰,等.采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(13):1-7. LI Shenghu, ZHANG Yifan, YU Xinyu, et al. Study on reactive power equilibrium distribution in wind power plants using improved droop control and double deck reactive power optimization [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(13):1-7.
- [13]MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017,2(1):1-9.
- [14]陈光宇,纪思,李干,等.基于DESA算法且含风电接入的配网无功优化[J].电工技术,2019(11):15-17,21. CHEN Guangyu, JI Si, LI Gan, et al. Distribution network reactive power optimization based on DESA algorithm and including wind power connection [J]. Electrical Engineering Technology, 2019(11):15-17,21.

(本文责编:陆华)

作者简介:

陈逸琿(1999),男,在读硕士研究生,从事电力系统运行与控制方面的研究,cyh70008@whu.edu.cn;

吴军(1976),男,副教授,工学博士,从事电力系统运行分析与控制、电力系统规划等方面的研究,byronwu@whu.edu.cn。