

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241239

# 基于构网变流器的新能源场站暂态电压分散协同控制策略

曹武<sup>1</sup>, 杨铭<sup>2</sup>, 胡波<sup>1</sup>, 朱凌志<sup>3</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学电工电子实验中心, 江苏 南京 211189;  
3. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为充分利用构网控制的电压源特性, 协同场站内多无功源进一步提升新能源场站对高比例新能源电力系统的暂态电压主动支撑能力, 提出了基于构网变流器的新能源场站暂态电压分散协同控制策略, 包括多无功源暂态电压控制改进策略和容量配置方法两方面。首先, 对场站无功源的基本特性进行分析。然后, 构网变流器增加了基于无功补偿的暂态控制, 提高暂态内电势电压。跟网变流器和静止同步补偿器(static var generator, SVG)分别通过暂态有功/无功自适应变化控制策略、暂态参考值变化策略, 增大两者的暂态无功出力。静止无功补偿器(static var compensator, SVC)采用暂稳态切换控制策略, 由稳态的无功控制切换为电压控制, 以进一步提高电压调节水平。同时基于最大暂态电流和补偿容量需求提出多无功源的容量配置方法。最后, 构建弱电网下暂态电压主动支撑典型场景, 验证了所提分散协同控制策略提高了场站的暂态电压支撑能力, 挖掘了构网控制在场站主动暂态电压支撑方面的作用。

**关键词:** 构网; 暂态电压; 主动支撑; 新能源; 分散协同控制

## Transient voltage decentralized cooperative control strategy of renewable energy station based on the grid forming converter

CAO Wu<sup>1</sup>, YANG Ming<sup>2</sup>, HU Bo<sup>1</sup>, ZHU Lingzhi<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Electrical and Electronic Experiment Center, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

**Abstract:** To fully utilize the voltage source characteristics of grid forming control and coordinate multiple reactive power sources within renewable energy power plants to enhance their transient voltage support capability in power systems with high renewable penetration, a decentralized coordinated transient voltage control strategy is proposed for renewable energy plants based on grid forming converters. This strategy includes an improved transient voltage control strategy for multiple reactive power sources and a method for capacity allocation. First, the basic characteristics of reactive power sources in the power plant are analyzed. Then, a transient control based on reactive power compensation is introduced into grid forming converters to increase the transient internal potential voltage. Grid following converter and static var generator (SVG) respectively adopt adaptive transient active/reactive control and reference value adjustment strategies to increase their transient reactive power outputs. For static var compensator (SVC), a transient switching strategy is employed to switch from steady-state reactive power control to voltage control to further improve voltage regulation performance. Meanwhile, a capacity allocation method for multiple reactive power sources is proposed based on maximum transient current and reactive compensation requirement. Finally, a typical scenario of active transient voltage support is built under weak network conditions to validate that the proposed decentralized collaborative control strategy improves the transient voltage support capability of the plant, highlighting the role of grid forming control in active transient voltage support.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2400500).

**Key words:** grid forming; transient voltage; active support; renewable energy; decentralized collaborative control

## 0 引言

随着新能源占比的不断提升, 新能源场站对电

网电压和频率的影响已不可忽视<sup>[1-4]</sup>。多次事故分析表明当前含高比例新能源的新型电力系统动态无功调节能力不足是造成机组大规模连锁脱网的重要原因。挖掘新能源场站的暂态电压主动支撑能力是新型电力系统安全稳定运行的关键<sup>[5-6]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400500)



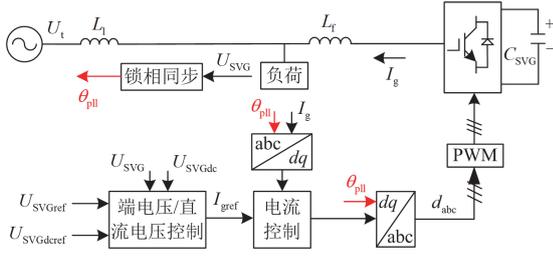


图3 SVG控制系统原理图

Fig. 3 Control system schematic diagram of SVG

#### 4) SVC

SVC 的典型结构如图 4 所示, 其中:  $X_{TCR}$  和  $X_{TSC}$  分别为晶闸管控制电抗器和晶闸管投切电容器的阻抗值;  $Q_{SVC}$  为 SVC 能够提供的无功功率。记晶闸管触发角为  $\alpha$ , 则 SVC 输出无功功率如式(1)所示。

$$Q_{SVC} = \left[ \frac{1}{X_{TSC}} - \frac{2(\pi - \alpha) + \sin \alpha}{\pi X_{TCR}} \right] U_t^2 \quad (1)$$

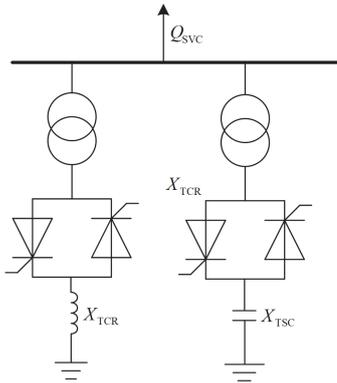


图4 SVC典型结构

Fig. 4 Typical structure of an SVC

SVC 属于阻抗型被动无功补偿设备, 优势在于补偿容量可以通过投入电容、电感实现, 性价比较高; 但其无功输出能力与系统电压  $U_t$  的平方成正比, 在暂态低电压过程中其输出能力远低于标称容量, 同时在响应速度方面也弱于 SVG 和新能源变流器。

综上, 新能源变流器和 SVG 具有较快的响应、调节速度, 但过载能力不强; SVC 的响应速度慢于变流器和 SVG, 输出容量受系统电压影响, 但 SVC 的暂态电压无功补偿容量扩容较为容易。

## 2 多无功源暂态电压主动支撑架构

### 2.1 场站内电势的暂态电压控制机理

无功源输出能力受系统电压的影响较大<sup>[24]</sup>, 可在站内配置可靠的电压源以保证场站内部电压的稳定。参考同步发电机, 这个内部的电压源也可称为

场站内电势。将配置了内电势和无功补偿设备的新能源场站与电网近似为图 5 所示的二端口网络, 其中:  $E$  为场站等效内电势;  $x_r$  为场站等效连接电抗;  $x_s$  为系统等效连接电抗;  $x_c$  为无功补偿等效阻抗;  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  分别为各支路电流。

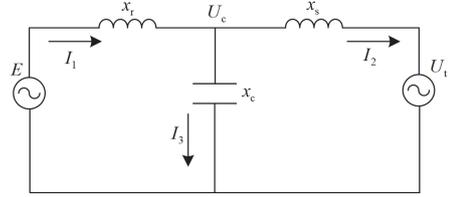


图5 场站与电网的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of station and grid

忽略阻抗上电阻, 由等效电路可得  $U_c$  的表达式为

$$U_c = \frac{1}{1 + \frac{x_r}{x_s} + \frac{x_r}{x_c}} E + \frac{1}{1 + \frac{x_s}{x_r} + \frac{x_s}{x_c}} U_t \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 场站内电势  $E$  的引入使得场站内依赖锁相同步的设备有了可靠的锁相依据。

考虑系统电压变化引起并联点电压变化, 变化后的并联点电压如式(3)所示。

$$\frac{U_c}{K_v} = \frac{E}{1 + \frac{x_r}{x_s} + \frac{x_r}{x_c}} + \frac{U_t}{(1 + \frac{x_s}{x_r} + \frac{x_s}{x_c}) K_s} \quad (3)$$

式中:  $K_v$  为并联点稳态电压与变化后并联点电压之比;  $K_s$  为系统稳态电压与变化后系统电压之比。

进一步假设场站内电势  $E$  可以保持稳定。若通过改变等效补偿阻抗  $x_c$ , 使得并联点电压恢复到稳态值, 则由式(2)和式(3)可得到补偿后的等效阻抗  $x'_c$  与系统电压、场站内电势的关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} (A - A')E + (B - B')U_t = 0 \\ A = K_v / (1 + \frac{x_r}{x_s} + \frac{x_r}{x_c}) & B = K_v / [(1 + \frac{x_s}{x_r} + \frac{x_s}{x_c})] \\ A' = 1 / (1 + \frac{x_r}{x_s} + \frac{x_r}{x'_c}) & B' = 1 / (1 + \frac{x_s}{x_r} + \frac{x_s}{x'_c}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $A$ 、 $A'$ 、 $B$ 、 $B'$  为简化表达的等效系数。

从式(4)可以看出, 在暂态低/过电压工况下, 通过  $x_c$  的变化, 使得  $A'$  接近于  $A$ , 进而实现补偿目标。由于场站的短路容量远小于系统的短路容量, 对应的  $x_r$  远大于  $x_s$ , 因此补偿阻抗的变化对系数  $A$  的影响大于对系数  $B$  的影响。

因此, 在新能源场站配置内电势对主动暂态电压支撑能力的主要影响包括: 保证跟网变流器、SVG、SVC 等无功源锁相环的稳定性, 降低补偿电

压所需无功容量的要求，进而保证了新能源场站的无功支撑能力。

### 2.2 基于构网变流器内电势的改进支撑架构

新能源场站多无功源暂态电压分散协同主动支撑架构如图 6 所示，其中各控制环节改进将在第 3 节详细说明，EN 为暂态工况标志位，即 EN 为 1 时

切换暂态工况控制。构网与跟网变流器并联后组成混合架构，与 SVC、SVG 在并网变压器低压侧(35 kV 侧)并联。构网变流器配置为场站内电势，跟网变流器和 SVG 支撑并网变压器低压侧(35 kV)电压，并对系统输出动态无功。SVC 在暂态工况后期对无功容量进行补偿。

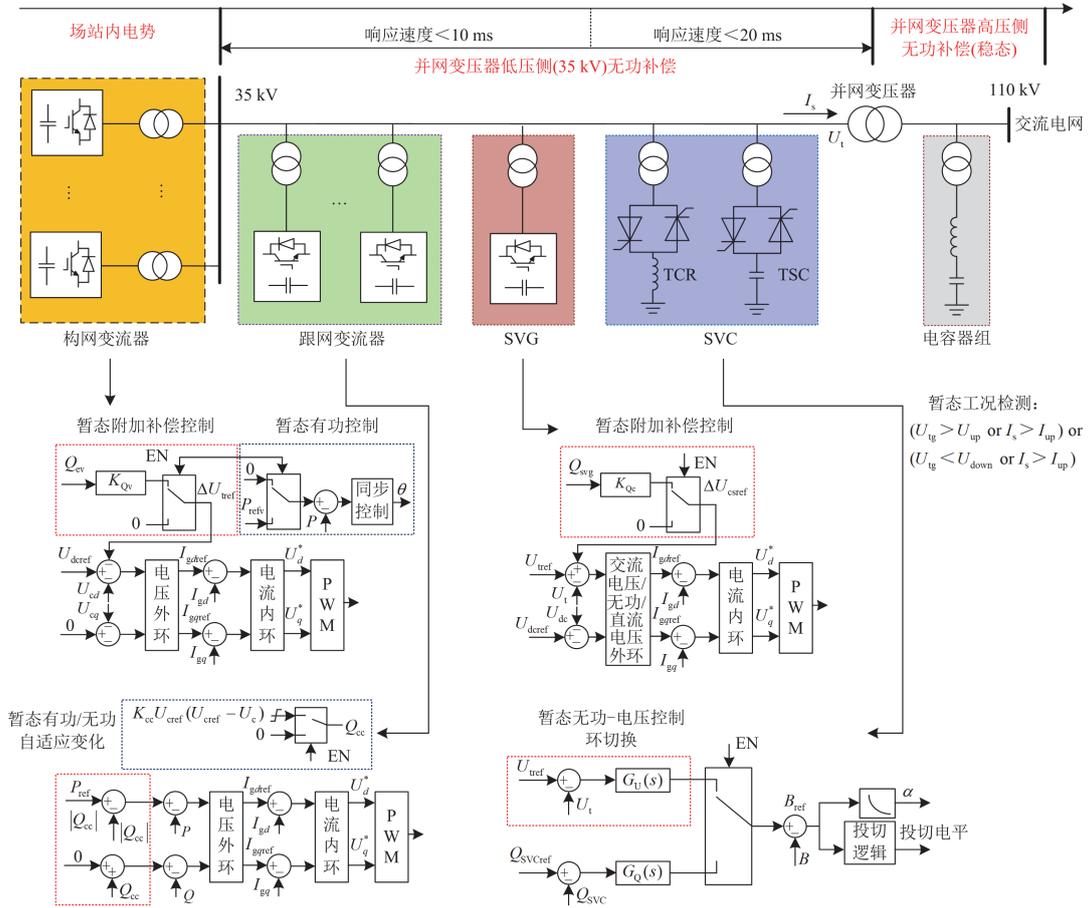


图 6 多无功源暂态电压分散协同主动支撑架构

Fig. 6 Active support system for transient voltage decentralized collaboration of multiple reactive sources

### 3 多无功源暂态改进控制策略

为区别暂态和稳态的不同控制模式，将系统电压变化作为暂态控制环或控制目标切换的条件，如式(5)所示。

$[(U_{tg} > U_{up}) \parallel (I_s > I_{up})] \parallel [(U_{tg} < U_{down}) \parallel (I_s > I_{up})]$  (5)  
 式中： $I_s$  为并网变压器低压侧电流实际值； $I_{up}$  为并网变压器低压侧电流阈值； $U_{up}$  和  $U_{down}$  分别为并网变压器低压侧电压上、下限； $U_{tg}$  为并网变压器低压侧实际值。

#### 1) 构网变流器

构网变流器控制目标电容上的电压与并联点电

压的相量关系如图 7 所示，其中： $I_{gs}$  为构网变流器网侧电流； $x_l$  为构网变流器与系统连接的电抗； $r_l$  为构网变流器与系统连接的电阻。

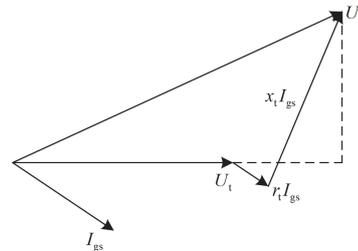


图 7 构网变流器与系统连接相量图

Fig. 7 Phase diagram of grid-forming converter connected with system

由图 7 所示相量图, 构网变流器电容电压与系统电压间的压降  $\Delta U_t$  可由式(6)进行计算。

$$(\Delta U_t)^2 = \left( \frac{P_{ev} r_t + Q_{ev} x_t}{U_c} \right)^2 + \left( \frac{P_{ev} x_t + Q_{ev} r_t}{U_c} \right)^2 \quad (6)$$

式中:  $P_{ev}$  和  $Q_{ev}$  分别为构网变流器输出有功和无功功率。

由式(6)可以看出, 当出现暂态低/过电压工况时, 由于构网变流器输出无功功率的急速增加, 构网变流器到系统的压降随之增大。为尽量发挥场站内电势对场站无功输出能力的支撑以及提高暂态电压工况下的短路容量, 在构网变流器稳态控制的基础上, 对其输出压降进行补偿。同时, 为最大化无功支撑能力, 有功功率给定值在暂态情况下设为 0。构网变流器的暂态工况控制策略如图 6 所示, 其中暂态电压补偿通过改变变流器控制电压给定值实现。忽略连接电阻的影响简化式(6), 暂态附加控制电压给定值可由式(7)进行计算。

$$\Delta U_{ref} = K_{Qv} Q_{ev} \quad (7)$$

式中:  $\Delta U_{ref}$  为暂态附加控制电压给定值;  $K_{Qv}$  为电压补偿系数, 其取值依据构网变流器并网变压器的漏感值。

为保证构网变流器在暂态电压过程中仍具有电压源特性, 使其在电流限幅的情况下依然采用同步控制输出的相角, 暂态下对有功功率控制目标进行切换, 保证了暂态下同步控制的可靠性。

## 2) 跟网变流器

跟网变流器的稳态控制以输出有功功率为主, 通常控制功率因数接近于 1, 其输出有功功率给定值由调度系统下发。在暂态工况中, 为输出无功功率, 需要对有功功率和无功功率的控制目标进行调整, 在保证变流器安全运行、不切除的同时对系统进行无功补偿。

跟网变流器的控制目标是对构网变流器的压降进行补偿并对系统输出动态无功, 因此可将构网变流器的补偿量作为跟网变流器在暂态情况下的无功输出目标, 其暂态无功控制目标计算如式(8)所示。

$$Q_{cc} = K_{cc} U_{cref} (U_{cref} - U_c) \quad (8)$$

式中:  $Q_{cc}$  为跟网变流器暂态无功控制目标;  $K_{cc}$  为跟网变流器补偿系数, 其取值依据跟网变流器并网变压器的漏感值;  $U_{cref}$  为构网变流器电容电压控制目标。

受变流器电力电子器件的限制, 暂态功率要从有功功率中减去, 因此跟网变流器的暂态控制策略如图 6 所示。

## 3) SVG

SVG 作为动态无功补偿设备, 在稳态和暂态情况下都可以对系统电压进行调节。稳态下 SVG 主要应对电压的小范围波动, 暂态情况下 SVG 主要应对较大范围的电压波动。为提高 SVG 的暂稳态自适应能力, 将电压补偿目标叠加至 SVG 的电压控制目标, 改变暂态下控制参考值。SVG 的暂态控制策略如图 6 所示, 电压控制目标计算如式(9)所示。

$$\Delta U_{csref} = K_{Qc} Q_{svg} \quad (9)$$

式中:  $\Delta U_{csref}$  为 SVG 自适应补偿电压附加给定值;  $K_{Qc}$  为 SVG 补偿系数, 其值可根据 SVG 升压变压器的漏感进行选取;  $Q_{svg}$  为 SVG 输出无功功率。

## 4) SVC

针对 SVC 稳态和暂态, 设置不同的控制闭环, 稳态下以无功功率为控制目标, 为暂态工况保留动态无功备用; 暂态下以维持场站电压为目标。在场站电压和电流同时超过设定阈值的情况下, SVC 从原有的稳态无功控制切换为电压控制, SVC 的暂态控制策略如图 6 中所示, 其中:  $U_{ref}$  为系统电压的给定值;  $Q_{svcref}$  为 SVC 无功控制给定值;  $B_{ref}$  和  $B$  分别为 SVC 导纳给定值和实际值;  $G_U(s)$  和  $G_Q(s)$  分别为电压控制环节和无功控制环节的传递函数。为保证暂态控制效果, 电压控制环节的控制参数应按照略大于变流器调节时间进行整定; 稳态下无功控制环节的参数则应按照远大于暂态调节时间的原则进行整定。

总结多无功源的暂态控制功能如表 1 所示。

表 1 多无功源暂态控制

Table 1 Transient control of multiple reactive sources

	构网变流器	跟网变流器	SVG	SVC
控制目标	控制场站内电势	输出无功功率补偿电压	补偿并网变压器低压侧电压	切换暂态电压控制输出无功
控制系统	自身闭环控制			
时间尺度	10~300 ms	10~300 ms	10~300 ms	<300 ms

## 4 多无功源容量配置原则

根据多无功源的控制策略及其在新能源场站暂态电压支撑架构中的作用, 对场站内构网、跟网变流器、SVG、SVC 的无功容量配置原则进行分析。

对于构网变流器, 主要考虑其在暂态工况下的电流承受能力。多个构网变流器并联接入电网的等效电路如图 8 所示, 其中:  $E_n$  为构网变流器等效电压;  $x_{vn}$  为构网变流器滤波电抗;  $I_s$  为多构网变流器

总电流； $I_n$  为构网变流器等效电流。由于系统电压的变化，构网变流器在暂态工况发生的最初 10 ms 内电流变化量将达到最大。进一步假设在暂态工况发生时刻电网功角保持不变，则变流器的变化全部由电压幅值的改变引起。假定构网变流器参数一致以及有功功率输出为 0，根据等效电路及变流器电流最大值，可得构网变流器电流变化与构网变流器数目之间的关系如式(10)所示。根据系统电压下降情况以及变流器电流限值可以确定构网变流器的数目。

$$\begin{cases} \Delta I_1 = \frac{k_d U_t - E_1}{x_{v1} + N_v x_s} \\ N_v \geq \frac{k_d U_t - E_1 - I_{g \max} x_{v1}}{I_{g \max} x_s} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\Delta I_1$  为构网变流器电流增量； $k_d$  为系统电压下降系数； $N_v$  为构网变流器数目； $I_{g \max}$  为构网变流器电流最大值。

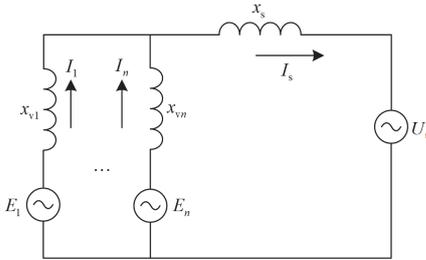


图 8 多构网变流器并联简化等效电路

Fig. 8 Simplified equivalent circuit for parallel connection of multiple grid-forming converters

对于跟网变流器，其数目和容量由新能源场站的输出能力决定，在暂态工况下其输出能力主要取决于跟网变流器的补偿系数  $K_{cc}$ 。考虑暂态工况下场站有功输出应发尽发的原则， $K_{cc}$  的取值应首先考虑场站有功输出的需求。

在当前的新能源场站中，对电网影响较大、容量较大的场站主要采用 SVG 作为无功补偿方式。在本文的暂态电压支撑架构中，具有快速补偿特性的 SVG 主要用来抑制电压的小范围波动。因此 SVG 可以依据电压小范围波动情况下的无功补偿需求进行确定。根据对新能源场站中各种设备无功损耗的计算，大型光伏、双馈式风机、永磁直驱式风机场站的稳态无功补偿容量一般应设置为场站总容量的 20%~30%，恒速恒频风机场站的稳态无功补偿容量为场站总容量的 50%~60%。

SVC 的响应速度慢于变流器控制，但由于其经济性，在场站内电势存在的情况下可作为暂态工况下无功补偿容量的补充。SVC 的容量应该要满足暂

态工况下无功补偿需求，其容量配置可依据式(11)进行计算，计算中构网/跟网变流器最大输出无功功率可由其额定功率值代替。

$$\begin{cases} Q_D = \frac{(U_c - U_{busL})^2}{x_T} \\ Q_{SVC\_d} = Q_D - Q_{v\_max} - Q_{i\_max} - Q_{SVG\_d} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $Q_D$  为暂态无功补偿需求容量； $U_{busL}$  为构网变流器升压变压器的高压侧电压，其值可取暂态低电压情况下电压的最小值和暂态过电压情况下电压的最大值； $x_T$  为构网变流器升压变压器阻抗； $Q_{SVC\_d}$  为 SVC 计算容量； $Q_{v\_max}$  为构网变流器最大输出无功功率； $Q_{i\_max}$  为跟网变流器最大输出无功功率； $Q_{SVG\_d}$  为 SVG 计算容量。

## 5 仿真分析

基于 PSCAD 按照图 9 搭建含多无功源的新能源场站仿真模型，其中将多台参数相同的构网/跟网变流器进行聚合等效<sup>[25]</sup>，等效为一个构网/跟网变流器。系统及无功源主要参数如表 2 所示。系统设置为弱电网，系统容量设置为 500 MVA，场站容量设置为 200 MVA。为简化仿真，作如下假设：1) 变流器直流电压设置为常数<sup>[26]</sup>；2) 变流器有功功率的变化范围为 0 到额定值。

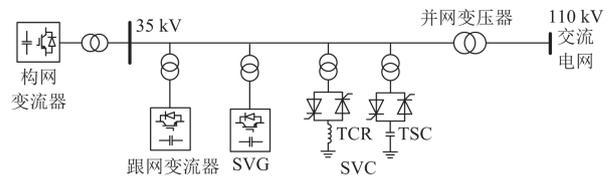


图 9 含多无功源的新能源场站仿真模型

Fig. 9 Simulation model of a renewable energy station with multiple reactive sources

新能源场站的高/低电压穿越相关标准规定变流器在暂态工况中至少在 1 s 内保持无功输出。本节对系统电压骤降 80% 和升高 30% 的暂态工况进行仿真，考察新能源场站多无功源对场站并网点电压和并网变压器低压侧(35 kV)的主动支撑情况。

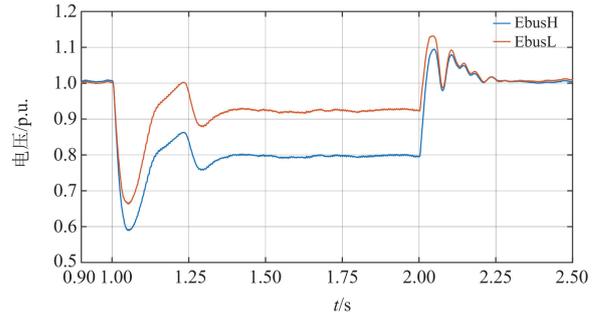
### 5.1 工况 1: 电压骤降 80%

在  $t = 1$  s 时系统电压骤降 80%，经 1 s 后恢复，相关仿真结果如图 10 所示，其中 EbusH 为新能源场站并网点电压波形，EbusL 为并网变压器低压侧(35 kV)电压波形； $P_{mv}$  和  $Q_{mv}$  分别为等效构网变流器输出有功功率和无功功率； $P_{mi}$  和  $Q_{mi}$  分别为等效跟网变流器输出有功功率和无功功率； $Q_{SVG}$  为 SVG 输出无功功率； $Q_{SVC}$  为 SVC 输出无功功率。

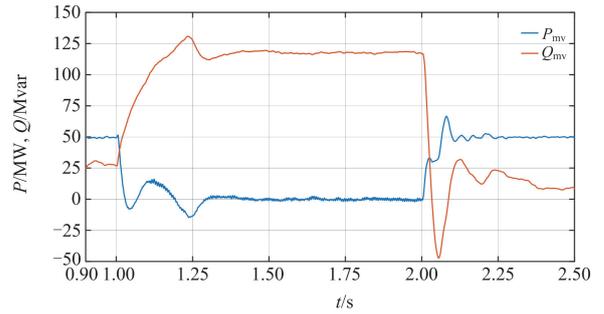
表 2 仿真参数表

Table 2 Main parameters of simulation

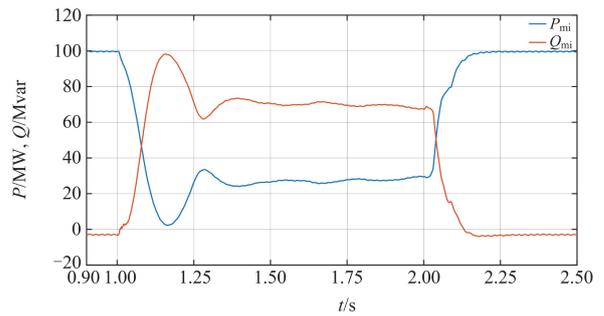
参数		数值
滤波器	$L_1/\text{mH}$	0.002
	$R_1/\Omega$	0.0001
	$C/\mu\text{F}$	2000
	$L_2/\text{mH}$	0.001
	$R_2/\Omega$	0.0001
跟网变流器	电流环 PI 参数 $K_{pi}$	0.5
	$K_{ii}$	100
电压环 PI 参数	$K_{pv}$	0.1
	$K_{iv}$	50
PLL 参数	$K_{p\_pll}$	50
	$K_{i\_pll}$	100
控制给定	$P_{ref}/\text{MW}$	100
	$Q_{ref}/\text{Mvar}$	0
控制系数	$K_{ce}$	3000
电流限幅	$I_{lim}/\text{kA}$	200
阻抗及支撑电容	$L_{11}/\text{mH}$	0.002
	$R_{11}/\Omega$	0.0001
	$C_1/\mu\text{F}$	80000
	$L_{22}/\text{mH}$	0.001
	$R_{22}/\Omega$	0.0001
构网变流器	电流环 PI 参数 $K_{pi}$	1
	$K_{ii}$	600
电压环 PI 参数	$K_{pv}$	0.5
	$K_{iv}$	500
控制给定	$U_{cref}/\text{kV}$	0.6
	$P_{ref}/\text{MW}$	50
下垂控制	$m_p$	0.02
电流限幅	$I_{g\max}/\text{kA}$	200
SVG	电流环 PI 参数 $K_{piSVG}$	1
	$K_{iiSVG}$	400
外环 PI 参数	$K_{pvSVG}$	0.5
	$K_{ivSVG}$	200
直流电压控制目标	$U_{dcref}/\text{kV}$	18
交流电压控制目标	$U_{acref}/\text{kV}$	35
电流限幅	$I_{limSVG}/\text{kA}$	100
TSC 容量	$Q_{TSC}/\text{Mvar}$	100
TSC 组数	$N_{TSC}$	10
TCR 容量	$Q_{TCR}/\text{Mvar}$	10
SVC	无功环 PI 参数 $K_{piSVC}$	0.005
	$K_{iiSVC}$	0.05
电压环 PI 参数	$K_{pvSVC}$	0.1
	$K_{ivSVC}$	2
开关频率	$f_s/\text{kHz}$	10
系统阻抗	$L_{s1}/\text{H}$	0.82



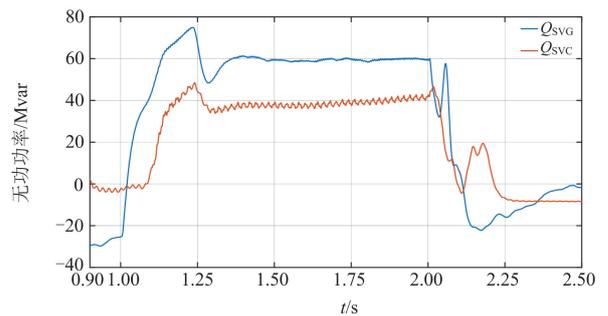
(a) 场站并网点及35 kV侧电压



(b) 构网变流器输出功率



(c) 跟网变流器输出功率



(d) SVG和SVC输出无功功率

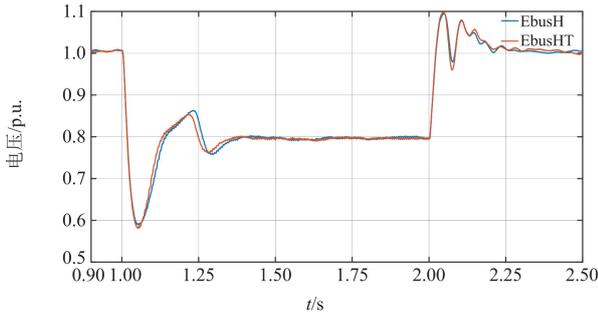
图 10 电压骤降下的暂态电压控制

Fig. 10 Transient voltage control under voltage sag

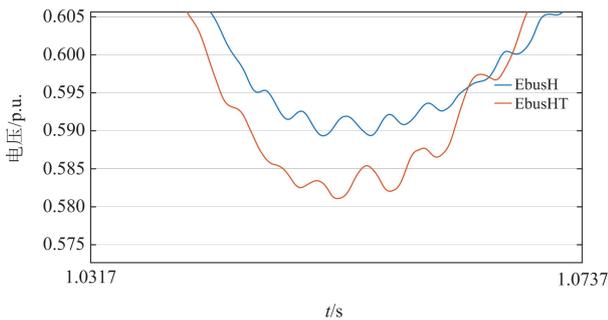
从图 10 中可以看出,在系统电压下降后的 200 ms 内,并网变压器低压侧(35 kV)电压可以恢复至 0.9 p.u.以上,场站并网点电压可以恢复至 0.8 p.u.。跟网变流器在并网点电压恢复到一定程度后,其有

功率输出逐渐增加，避免了切除全部有功功率的风险。本文通过提高 SVC 中 TSC 中单组电容器容量的方式来加大电压控制死区范围，减小电压恢复后的电压超调程度。

将有无构网变流器和 SVG 附加控制的场站并网点电压进行对比，结果如图 11 所示，其中 EbusHT 为不含附加控制下的场站并网点电压。在含有暂态附加控制的情况下，最低点电压提升了约 0.01 p.u.。



(a) 场站并网点电压对比

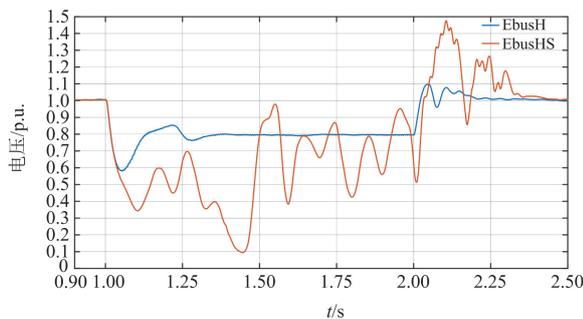


(b) 最低点电压放大

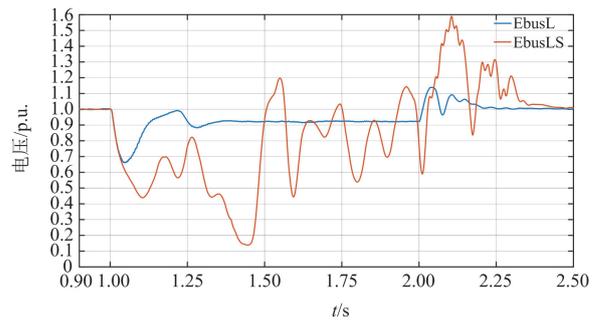
图 11 有无附加控制的场站并网点电压对比

Fig. 11 Comparison of grid-connection voltages of station with or without additional control

在暂态工况下，通过切换跟网变流器有功功率和无功功率控制目标，保证其不会因过流而被切除，进而实现暂态电压支撑。图 12 为有无跟网变流器切换控制的暂态电压对比，其中 EbusHS 和 EbusLS 分别为无切换控制下的场站并网点电压和 35 kV 侧



(a) 场站并网点电压对比



(b) 35 kV 侧电压对比

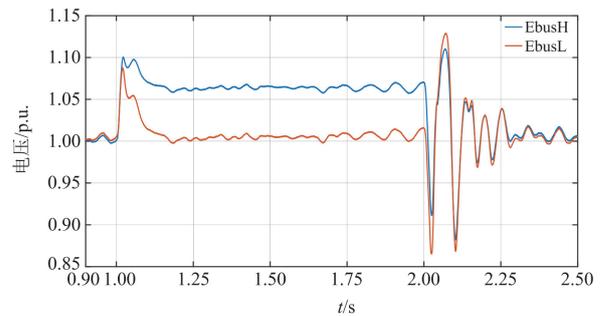
图 12 有无跟网变流器切换控制的电压对比

Fig. 12 Voltage comparison with or without switching control in grid-following converter

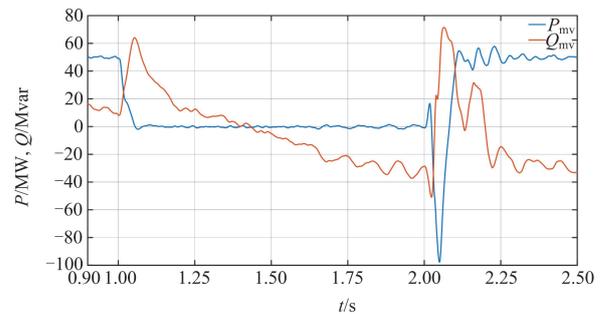
电压。可以看出，在缺乏足够容量的无功功率支撑情况下，暂态电压振荡较大，不利于暂态电压工况下系统的安全运行。

### 5.2 工况 2: 电压骤升 30%

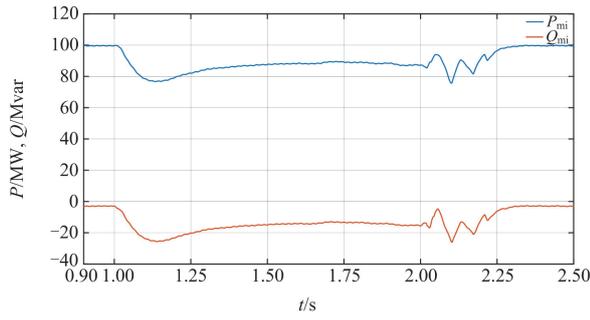
对于暂态过电压工况，由于需要大量感性无功，SVC 参数变更为：TSC 的容量为  $2 \times 20$  Mvar；TCR 的容量为 180 Mvar。在  $t = 1$  s 时系统电压骤升 30%，经 1 s 后恢复，相关仿真结果如图 13 所示。可以看出，多无功源对暂态过电压也有很好的抑制作用，尖峰电压持续不超过 100 ms。在电压恢复时刻，由于构网变流器有功输出的增加，场站电压有 100 ms 左右的振荡，但调节速度较快，对故障恢复的影响较小。



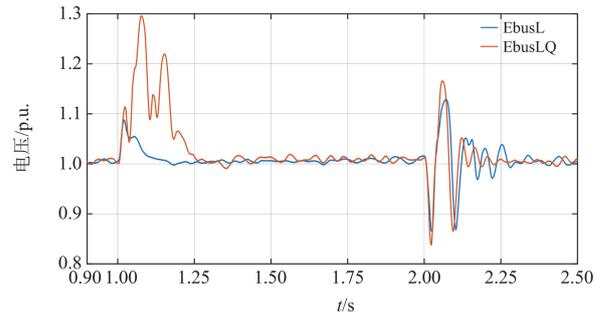
(a) 场站并网点及 35 kV 侧电压



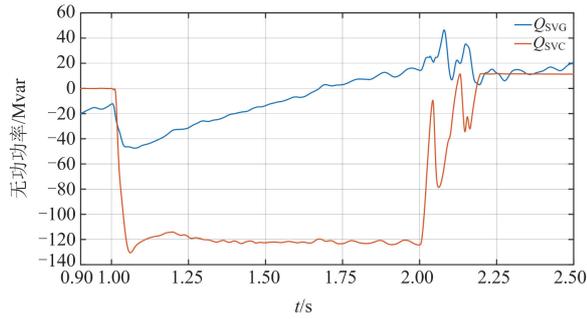
(b) 构网变流器输出功率



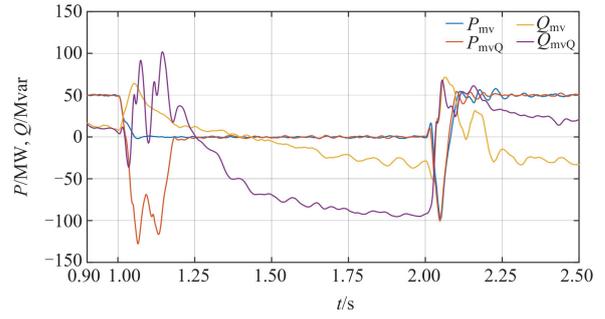
(c) 跟网变流器输出功率



(b) 35 kV侧电压



(d) SVG和SVC输出无功功率

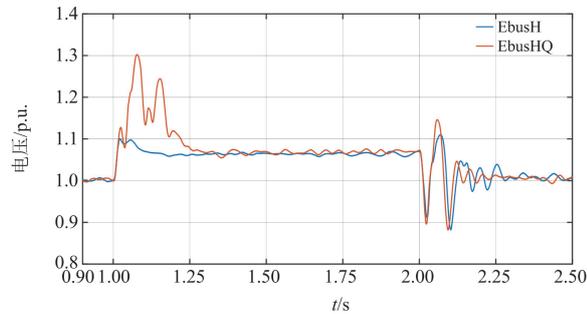


(c) 构网变流器输出功率

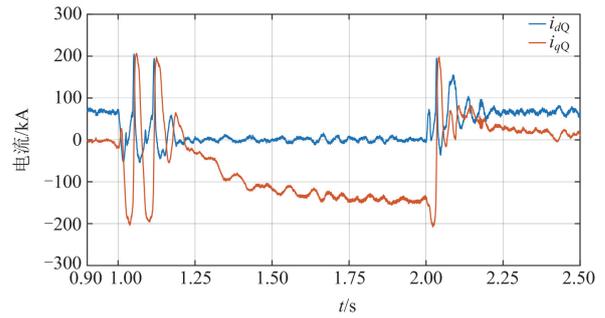
图 13 电压突升下的暂态电压控制

Fig. 13 Transient voltage control under voltage rise

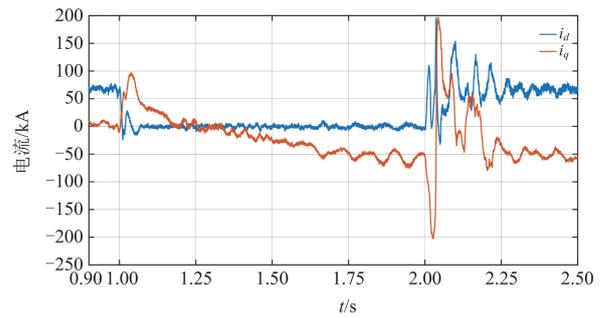
为进一步分析多无功源的协调作用, 对有无 SVC 的暂态电压支撑效果进行对比, 结果如图 14 所示。其中 EbusHQ 和 EbusLQ 分别为无 SVC 时场站并网点和 35 kV 侧电压,  $P_{mvQ}$  和  $Q_{mvQ}$  分别为无 SVC 时构网变流器输出有功功率和无功功率,  $i_{dQ}$  和  $i_{qQ}$  分别为无 SVC 时构网变流器输出电流的  $d$ 、 $q$  轴分量,  $i_d$  和  $i_q$  分别为有 SVC 时构网变流器输出电流的  $d$ 、 $q$  轴分量。可以看出, 在不含 SVC 时, 构网变流器在暂态电压初期进入电流限幅状态, 导致构网变流器实际输出电流与同步控制输出的相角不一致, 引起较大的有功和无功变化, 恶化了暂态电压工况。而在含有 SVC 工况下, 构网变流器可以较好地维持电压源特性, 保证了其对场站电压的支撑作用。



(a) 场站并网点电压



(d) 无SVC下构网变流器输出电流



(e) 有SVC下构网变流器输出电流

图 14 有无 SVC 的暂态电压支撑效果对比

Fig. 14 Comparison of transient voltage support with and without SVC

综合以上仿真结果可以看出, 本文提出的多无功源暂态电压支撑架构在暂态低/过电压情况下可

以对系统暂态电压进行主动支撑。所提策略将多无功源的运行特性和暂态电压支撑需求进行结合，实现了对暂态电压的有效主动支撑。

### 6 实验验证

为进一步实际验证本文策略，构建如图 15 所示的实验平台。该平台由 1 台构网变流器、1 台跟网变流器并联，通过阻抗与 1 台 SVG 和 SVC 相连接入电网，SVC 采用 TSC，无功源拓扑和控制如前文所述，系统及控制参数如表 2 所示，其中变流器控制系统 DSP 型号为 TI-TMS320F28335，FPGA 型号为 Altera-EP3C5，采用 Yokogawa DL850E 录波仪输出故障前后电压瞬时值和有效值波形。

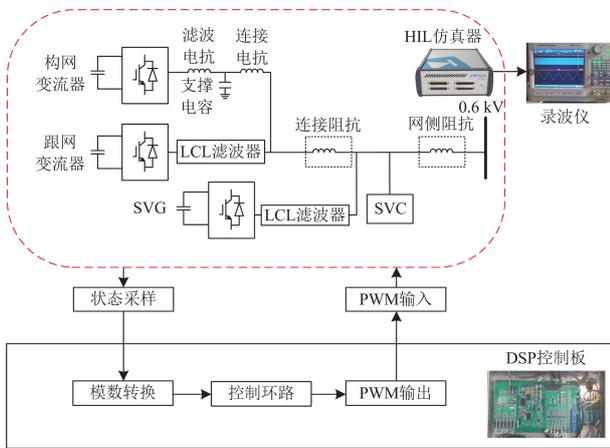
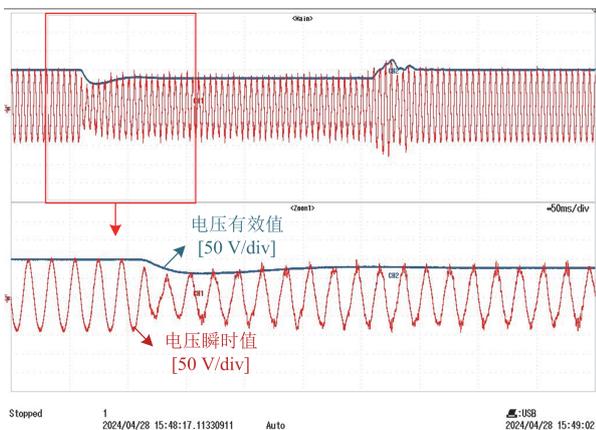


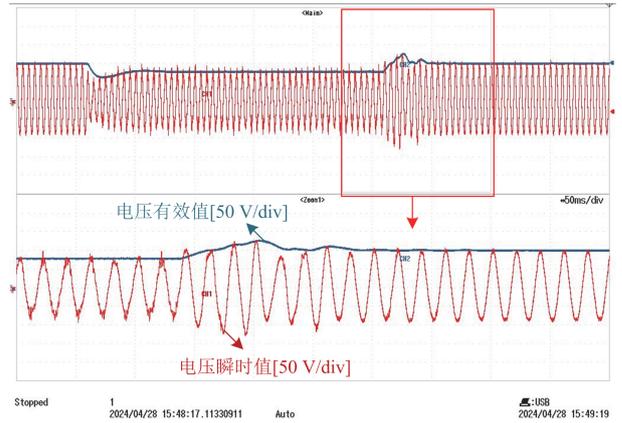
图 15 实验平台示意图

Fig. 15 Schematic diagram of experimental platform

图 16 为系统电压跌落至 10%工况下采用本文策略后的系统电压有效值和瞬时值波形，可以看出，实验结果与仿真结果一致，本文所提策略可以使得各类变流器充分发挥电压支撑能力，实现较好的场站暂态电压控制。



(a) 故障前



(b) 故障后

图 16 故障前后系统电压波形

Fig. 16 System voltage waveform before and after fault

### 7 结论

针对高比例新能源电网的暂态电压问题，对新能源场站的暂态电压主动支撑能力进行了研究，分析了多种无功源(构网、跟网变流器、SVC、SVG等)的无功输出特性，分析了构网变流器的内电势作用，改进新能源场站多无功源支撑架构，提出基于无功补偿的构网变流器暂态电压附加控制策略，提高暂态内电势；提出跟网变流器的暂态控制目标自适应切换控制策略、SVG的暂态参考值变化策略，提高暂态无功输出能力，在支撑电压的同时保证内电势的可靠性；以SVC在暂态末期进一步进行无功补偿，通过暂稳态不同控制环的切换控制实现稳态下动态无功补偿容量裕量控制和暂态下补偿无功功率的输出；并对多无功源的容量配置方法进行了讨论和分析；最后通过仿真和实验对所提策略的有效性和实用性进行了分析和验证。

### 参考文献

[1] 郭佳俊, 陈俊儒, 刘雨珊, 等. 构网型新能源电网支撑性能测试评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(12): 23-29.  
 GUO Jiajun, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Support performance test and evaluation of grid-forming renewable energy systems[J]. Smart Power, 2023, 51(12): 23-29.

[2] 于琳琳, 严格, 晏昕童, 等. 考虑电网支撑能力约束的直流落点及定容优化规划[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 175-185.  
 YU Linlin, YAN Ge, YAN Xintong, et al. Optimal planning of terminal locations and capacity of UHVDC considering constraints of receiving-end power grid support capability[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 175-185.

[3] ZHOU Y, AN J, MU G, et al. An improved constraint-

- inference approach for causality exploration of power system transient stability[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(4): 1-12.
- [4] 周良才, 周毅, 沈维健, 等. 基于深度强化学习的新型电力系统无功电压优化控制[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(9): 182-189.  
ZHOU Liangcai, ZHOU Yi, SHEN Weijian, et al. Reactive voltage optimization control of novel power system based on deep reinforcement learning[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(9): 182-189.
- [5] 乔立同, 汪挺, 刘剑宁, 等. 考虑源网荷储协调互动的配电网无功优化[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(5): 146-151, 189.  
QIAO Litong, WANG Ting, LIU Jianning, et al. Distribution network reactive power optimization considering generation network load storage interaction[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(5): 146-151, 189.
- [6] 李世林, 季亮, 常潇, 等. 基于改进白化权函数聚类的新能源电压支撑能力量化评估方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(8): 73-80.  
LI Shilin, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Quantitative evaluation method of new energy voltage support capability based on improved whitening weight function clustering[J]. *Smart Power*, 2024, 52(8): 73-80.
- [7] 刘京波, 宋鹏, 吴林林, 等. 风电场无功电压控制系统运行现状分析及提升措施[J]. *中国电力*, 2018, 51(8): 130-138.  
LIU Jingbo, SONG Peng, WU Linlin, et al. Operation situation analysis and improvement measures for automatic voltage control system of wind farms[J]. *Electric Power*, 2018, 51(8): 130-138.
- [8] 向川, 畅昶, 周鑫, 等. 大规模新能源并网下 SVG 协同风电场的电压精细化控制策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(5): 61-71.  
XIANG Chuan, CHANG Chang, ZHOU Xin, et al. Research on meticulous voltage cooperative control strategy between SVG and wind farm under the integration of large-scale renewable energy[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(5): 61-71.
- [9] 王伟, 孙明冬, 朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(23): 84-89.  
WANG Wei, SUN Mingdong, ZHU Xiaodong. Analysis on the low voltage ride through technology of DFIG[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(23): 84-89.
- [10] 韦徽, 王俊辉, 茹心芹, 等. 基于电网电压前馈补偿的光伏并网逆变器零电压穿越控制[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(4): 78-84.  
WEI Zheng, WANG Junhui, RU Xinqin, et al. Zero voltage ride-through control strategy of photovoltaic grid-connected inverter based on compensation for phase of feed-forward grid voltage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(4): 78-84.
- [11] 刘湃. 风电机组低电压穿越无功支撑控制及其稳定性分析[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
LIU Pai. Reactive power compensation control of DFIG and stability analysis during LVRT process[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [12] 王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4612-4620.  
WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4612-4620.
- [13] 李可雨, 王峰, 贾红云, 等. 基于光伏逆变器的快速功率控制系统研究及应用[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(4): 241-247.  
LI Keyu, WANG Feng, JIA Hongyun, et al. Research and application of rapid power control system based on photovoltaic inverter[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(4): 241-247.
- [14] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(9): 124-129.  
SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(9): 124-129.
- [15] 张起瑞, 辛超山, 李凤婷, 等. 多直流协调的新能源送端地区暂态过电压抑制策略[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(1): 98-106.  
ZHANG Qirui, XIN Chaoshan, LI Fengting, et al. Multi DC coordinated transient overvoltage suppression strategy for high proportion new energy sending terminal area[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(1): 98-106.
- [16] 李帅虎, 向振宇, 彭寒梅, 等. 基于模型预测控制的 SVC 与 STATCOM 协调控制器[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 4218-4224.  
LI Shuaihu, XIANG Zhenyu, PENG Hanmei, et al. SVC and STATCOM coordination controller based on model predictive control[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4218-4224.
- [17] 韩民晓, 赵正奎, 郑竞宏, 等. 新能源场站电网暂态电压

- 支撑技术发展动态[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1309-1327.  
HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, ZHENG Jinghong, et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large-scale renewable energy generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1309-1327.
- [18] 秦艳辉, 尹纯亚, 段青熙, 等. 直流近区系统故障下的暂态电压特性分析及支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 169-177.  
QIN Yanhui, YIN Chunya, DUAN Qingxi, et al. Research on transient voltage characteristics and support strategy under a fault occurred in the near-zone of HVDC sending system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 169-177.
- [19] 付红军, 孙冉, 王建波, 等. “双碳”背景下受端电网火电机组增加调相功能关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 132-143.  
FU Hongjun, SUN Ran, WANG Jianbo, et al. Key technologies of adding a condenser function in thermal power units in the receiving end power grid given a background of carbon peak and neutrality[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 132-143.
- [20] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515.  
ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.
- [21] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
QU Zisen. Synchronizing stability analysis and control technology of voltage source converters in power system with high-penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [22] 尚磊, 唐王倩云, 苏适, 等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 83-93.  
SHANG Lei, TANG Wangqianyun, SUN Shi, et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 83-93.
- [23] PAN D, WANG X, LIU F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 2(8): 1019-1033.
- [24] ROSSO R, WANG X, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends-a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [25] 欧阳金鑫, 张澳归, 余建峰, 等. 主动支撑电网的双馈风电场故障功率协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 32-43.  
OUYANG Jinxin, ZHANG Aogui, YU Jianfeng, et al. Coordinated fault power control method for doubly-fed wind farms with active grid support[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 32-43.
- [26] CHEN Z, LASSETER R H, JAHNS T M. Active power reserve control for grid-forming PV sources in microgrids using model-based maximum power point estimation[C]// 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 29-October 3, 2019, Baltimore, MD, USA: 41-48.

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2025-01-10

作者简介:

曹武(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: caowu\_ee@seu.edu.cn

杨铭(1986—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中应用。E-mail: yangming\_ee@seu.edu.cn

(编辑 张颖)