第 49 卷 第 1 期：61-72 高电压技术 Vol.49, No.1: 61-72
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220576

储能型静止无功发生装置及其自同步电压源控制

张家玮[1,2]，张 琛[1,2]，史先强[1,2]，张 宇[1,2]，黄 磊[3]，蔡 旭[1,2]
（1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系，上海 200240；2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240；3. 思源电气股份有限公司，上海 201108）

摘 要：针对构建新型电力系统对新能源场站惯量和电压支撑性的迫切需求，提出了一种面向高压大容量场景，且具有自主惯量响应和主动电压支撑能力的储能型静止无功发生装置(energy-storage-type static-var-generator, ESVG)，以提升新能源场站的友好并网运行能力。通过在风电场常规高压直挂式静止无功补偿装置(static var generator, SVG)上集成超级电容储能元件，使 SVG 具备有功和无功 4 象限运行的能力；针对该电路拓扑，进一步提出一种基于内电势下垂+环形限流的自同步电压源控制方法，不仅实现了对电网频率和电压的自主、快速支撑，而且可以维持装备在限流控制期间的电压源特性，较全面地逼近了同步机特性。基于提出的控制方法，给出了面向电网频率和电压响应需求的控制参数整定方法。最后，在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了 ESVG 并网系统电磁暂态仿真模型，仿真结果表明：ESVG 能够在电网频率或电压波动时主动输出有功功率/无功功率，并能减少因电网有功负荷突然增加引起的频率变化，体现出较好的自主惯量响应和电压支撑能力。

关键词：链式电路；SVG；电压源控制；惯量响应；电压支撑；超级电容

Energy-storage-type Static Var Generator and Its Autonomous-synchronization Voltage Source Control

ZHANG Jiawei[1,2], ZHANG Chen[1,2], SHI Xianqiang[1,2], ZHANG Yu[1,2], HUANG Lei[3], CAI Xu[1,2]
(1. Department of Electrical Engineering, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiao Tong University, Ministry of Education, Shanghai 200240, China; 3. Sieyuan Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: The inertia response and voltage support capability of renewable power generations (RPGs) are urgently required in the construction of new-type power system, thus, for high voltage and high rating application scenarios, this paper proposed an energy-storage-type static-var-generator (ESVG) with the capability of autonomous grid support functions, which can help the wind farms achieve grid-friendly integration and operation. By integrating supercapacitors into the existent high voltage SVG of wind farms, the SVG can achieve four-quadrant active and reactive operation. Furthermore, based on the proposed converter circuit, a self-synchronous voltage source control based on the inner-electromotive-force droop with the circular current limitation strategy is proposed. The resulting control method can be adopted to not only achieve autonomous frequency response and grid voltage support, but also retain the voltage source characteristics during the current limitation control period of the device, mimicking a rather complete characteristics of the synchronous generator. In addition, the tuning method for the key control parameters oriented for grid frequency and voltage support demands is provided. Finally, an electromagnetic transient (EMT) simulation model of the grid-tied ESVG system is constructed in Matlab/Simulink. Simulation studies indicate that ESVG can actively output active/reactive power when the grid frequency/voltage fluctuates, reduce the frequency change due to the sudden increase of load in the grid, exhibiting rather satisfactory autonomous inertia response and voltage support capability.

Key words: cascaded H-bridge circuit; SVG; voltage source control; inertia response; voltage support; supercapacitor

0 引言

构建新型电力系统是实现“双碳目标”的重要举措[1]，在此背景下，新能源将逐步取代常规火力电源，成为电力系统中的主力电源。以风力发电、光伏发电为代表的新能源电源若要取代常规同步电源成为电力系统的主体电源，就需要主动承担起支撑电网基本运行参数稳定的义务，如维持电压和频率基本稳定。然而，与常规基于同步发电机的电源

基金资助项目：思源电气股份有限公司科技项目(大功率电力电子装备若干关键技术研究)(21H010303388)。
Project supported by Technical Project of Sieyuan Electric Co., Ltd. (Research on Key Technologies of High-power Power Electronic Equipment) (21H010303388).

相比，新能源电源通常经电力电子变换器接入电网，故变换器控制对其并网行为特性影响深刻。在典型跟网型控制方法(即基于锁相环电压矢量定向和功率解耦控制)下，新能源电源不能自主响应和阻尼电网频率及电压的波动，由此导致的新能源高占比电力系统弱惯性、弱阻尼等问题十分突出，成为制约新能源并网率提升的瓶颈之一[2]，因此，迫切需要提升新能源电源的电网支撑能力。

针对新能源电网支撑能力提升的问题，目前学界、工业界主要从控制改进和附加装置两个方面来进行。具体地，在风电场经模块化多电平换流器的柔性直流输电并网系统中，通过改变风机变换器控制策略，如：通过检测风场频率变化和改变输出功率的方式引入虚拟惯量，可使风电机组具备一定的惯量响应和辅助电网频率调节的能力[3-6]。但这种基于频率检测的惯量释放方法存在较大的响应延时，为了实现惯量的快速与自主释放，基于虚拟同步控制(virtual synchronous generator, VSG)的方法备受关注。文献[7]通过虚拟同步控制对双馈风电机组的并网特性进行了重塑，使其具备了改善系统频率特性以及抑制功率振荡的能力。文献[8]提出了一种用于直驱型风电机组的 VSG 控制方法，不仅具有自主惯量响应能力，同时还对风电机组的高低穿特性进行了提升和优化。但总体上，这些通过改变机组控制策略以实现惯量响应的方法，通常会对风机的最大风能捕获性能以及机械载荷等造成影响，是风机提供惯性支撑必需考虑的经济和技术因素。

为缓解上述问题，考虑利用风电场集中储能来提升其整体电网支撑性[9]。文献[10]表明，风电场配备约为其 5%额定容量的储能装置就能使风电场产生与同容量同步机接近的惯量支撑效果。然而，受储能电池充放电倍率以及循环寿命等因素影响，电池储能频繁地参与惯量释放会给其寿命带来一定影响；更重要的是，在高压大容量储能系统普遍采用的链式电路拓扑结构下，由于二倍频瞬时功率波动的影响，如何安全和有效地释放其无功能力仍待开发和研究。因此，目前亟需一种能同时用于提升风电场惯量和电压支撑能力的支撑型电力电子装备。在此方面，考虑到现有大规模风电场、光伏电站均配备了一定容量的无功补偿装置(如静止无功补偿装置(static var generator, SVG))，以满足并网点电压的需求[11-12]；同时，惯量支撑对储能元件的能量密度要求并不高，因此在现有 SVG 上集成功率型储能元件可同时满足有功惯量和无功电压的支撑需求，颇具前景。类似的思路见文献[13]，其参考了用于电动汽车电机驱动的含储能的链式静止同步补偿器(static synchronous compensator with battery energy storage system, BS-STATCOM)电路，该文针对电网应用场景，提出了一种鲁棒控制策略，使其兼具有功和无功的传输功能。然而，该系统采用的是常规电流源控制策略，无法自主感知和响应电网频率变化。文献[14]通过对 SVG 的电容侧加装超级电容模组，并使用基于锁相环频率检测的惯用方法来实现阻尼电网频率波动，同样不具备响应的自主性，且惯量响应延时等问题依旧存在。

综上，新型电力系统构建对新能源场站大容量、一体化的惯量和电压主动支撑装备提出了迫切需求。为此，本文面向高压大容量场景，提出一种高压直挂式储能型无功发生装备(energy-storage-type static-var-generator, ESVG)，具备有功、无功 4 象限运行能力；针对该装备的电网惯量和电压主动支撑问题，提出了一种基于内电势下垂+环形限流策略的自同步电压源控制方法，不仅具备自主惯量响应和主动电压支撑能力，还可以维持装备在限流控制期间的电压源特性，使其较好地逼近同步机特性。最后，通过构建 Matlab/Simulink 仿真算例，对 ESVG 及其控制和电网支撑特性的有效性进行了全面验证。

1 ESVG 拓扑结构及其工作原理

1.1 ESVG 拓扑介绍

本文所提 ESVG 的基本电路结构如图 1 所示，采用级联 H 桥拓扑，其中每一相桥臂由 N 个功率模块串联而成，超级电容则耦合于功率模块的直流侧。得益于链式结构，采用星形接法通过连接电抗器直接接入 35 kV 电网，实现了无变压器高压直挂并网。在控制上，该系统将采用自同步电压源控制方法，实现主动惯量和电压支撑功能，该控制下的主要并网功能和支撑特性如图 2 所示。

另外，相比电池作为能量载体，本文采用超级电容作为惯量响应的能量载体，主要是出于以下几点考虑：

1）相较于锂电池，超级电容具有更高的功率密度与循环次数[15]，超级电容与锂电池的特性对比如表 1 所示。

2）如文献[10]所述，只需为风场配置 5%的储能即可实现等容量同步机的虚拟惯量效果，因此，

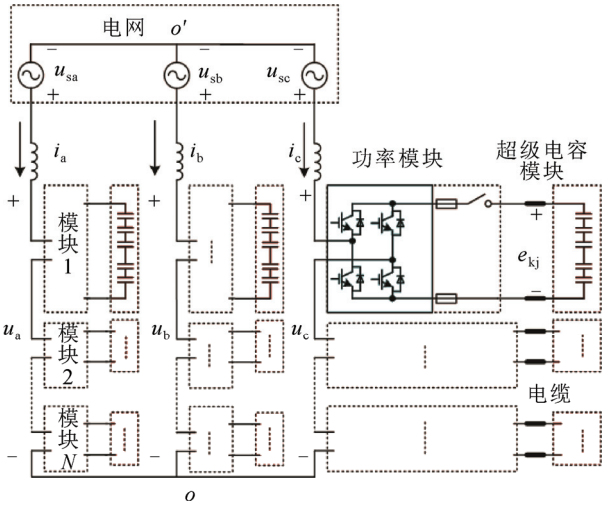


图 1　储能型静止无功发生装备

Fig.1　Energy-storage-type static var generator

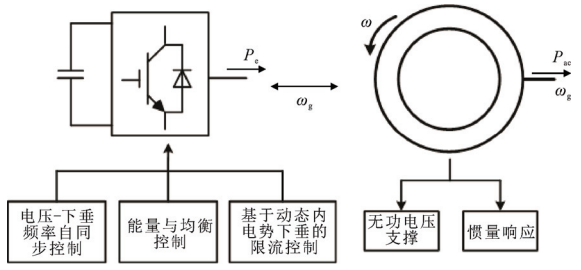


图 2　ESVG 在提出控制策略下的并网特性效果示意

Fig.2　Schematic of the effect of grid connected ESVG under the proposed control strategy

表 1　超级电容与锂电池特性对比

Table 1　Characteristics between battery and supercapacitor

储能元件	电池	超级电容
额定充放电时间/s	1080~10 800	1~30
功率密度/(W·kg^{-1})	50~300	1000~2000
能量密度/(Wh·kg^{-1})	20~180	1~10
充放电效率	0.7~0.85	0.9~0.95
额定工作温度范围/℃	−20~60	−40~65
循环寿命/次	500~2000	>100 000

低能量密度但同时具备较强短时过流能力的超级电容更适合作为惯量响应的储能介质。

3）链式结构直流侧存在固有功率脉动，若采用电池作为储能元件，则需要增加额外的脉动功率消除电路以减小无功功率控制下功率脉动对电池循环寿命的影响，而超级电容则不受该因素影响，具有较大优势。

1.2　ESVG 主电路方程

基于上述电路配置，ESVG 的主电路模型可用方程(1)表征。图 1 所示电路中，设电网电压 u_{sa}、u_{sb}、u_{sc} 三相对称，即

$$\begin{cases} u_{sa} = U_s \sin \omega t \\ u_{sb} = U_s \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc} = U_s \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \tag{1}$$

式中：U_s 为电网电压的幅值；ω 为电网角频率；t 为时间。

对于 ESVG，其输出电压 u_k 由 N 个模块的输出叠加得到，则有

$$u_k = \sum_{j=1}^{N} d_{kj} e_{kj} \tag{2}$$

式中：d_{kj} 为 k 相中第 j 个功率模块的开关函数；e_{kj} 为 k 相中第 j 个模块的直流母线电压，即超级电容模块电压；k=a，b，c，表示 a、b、c 三相；j=1, 2, …, N。ESVG 电压方程为

$$\begin{cases} u_{sa} - u_a = L\dfrac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} + ri_a \\ u_{sb} - u_b = L\dfrac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t} + ri_b \\ u_{sc} - u_c = L\dfrac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}t} + ri_c \end{cases} \tag{3}$$

式中：u_a、u_b 和 u_c 为 ESVG 输出三相电压；i_a、i_b 和 i_c 为流过 ESVG 的三相电流；L 为连接电抗器；r 为电抗器寄生电阻。该电路具体控制方法详见 1.3 节。

1.3　ESVG 的并网外特性控制

所提 ESVG 的整体控制系统主要由功率/电压控制环、内电势环和电流内环组成，如图 3 所示。

1）有功–频率控制方面，本文所提出 ESVG 采用自同步电压源控制方式，原理如下所述。

与电网频率和相位的同步通过模拟调相机机械运动特性的 2 阶模型实现，即在虚拟同步控制实现的基础上进行修改。由于传统调相机没有原动机，输入的有功功率为 0，因此根据转子运动方程，输出的电磁转矩、阻尼转矩、转动惯量和转速有如下关系

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega \\ J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = -T_e - T_d = -T_e - K_D(\omega_1 - \omega_0) \end{cases} \tag{4}$$

式中：T_e 为 ESVG 电磁转矩；T_d 为 ESVG 阻尼转矩；J 为 ESVG 的转动惯量；ω_1 为 ESVG 的角速度；ω_0 为电网同步角速度；K_D 为阻尼系数。ESVG 电磁转矩 T_e 可由电势 u_{tabc} 和输出电流 i_{gabc} 计算得到，即

$$T_e = P/\omega = \left(u_{ta}i_{ga} + u_{tb}i_{gb} + u_{tc}i_{gc}\right)/\omega \tag{5}$$

式中，P 为 ESVG 输出的电磁功率。

当电网频率发生波动时，ESVG 在有功功率–频率环的调节下能够自动实现与电网频率和相角的同步。

2）无功–电压控制方面，采用无功–电压下垂控制，令 ESVG 的无功功率指令 Q_{m} 为

$$Q_{\mathrm{m}}=Q^{*}+K_{\mathrm{ut}}\left(U_{0}-U_{\mathrm{t}}\right) \tag{6}$$

式中：U_0 为额定相电压幅值；U_{t} 为 ESVG 输出相电压幅值；K_{ut} 为电压调差系数；Q^{*}为并网无功指令。为使 ESVG 输出无功功率 Q 按照指令值 Q_{m} 变化，令无功功率偏差经积分环节得到 ESVG 虚拟内电势幅值，如式(7)所示。

$$U=K_{\mathrm{Q}}\int\left(Q_{\mathrm{m}}-Q\right)\mathrm{d}t+U_{0} \tag{7}$$

式中，K_{Q} 为无功调节系数。

输出无功 Q 可由电势 u_j 和输出电流 $i_j(j$=a,b,c) 计算得到

$$Q=\left(u_{\mathrm{ta}}-u_{\mathrm{tb}}\right)i_{\mathrm{gc}}+\left(u_{\mathrm{tb}}-u_{\mathrm{tc}}\right)i_{\mathrm{ga}}+\left(u_{\mathrm{ta}}-u_{\mathrm{tc}}\right)i_{\mathrm{gb}} \tag{8}$$

根据上述计算式可计算得到 ESVG 虚拟内电势的相角 θ 和幅值 U。

1.4 ESVG 的内电势和限流控制

为方便在控制功功率与无功功率时使二者解耦，通常会引入虚拟电感以增大交流侧阻抗角。本文采用基于动态下垂的内电势控制策略，该控制由虚拟导纳控制改进得出[16]，具体如下所述。

典型的虚拟导纳控制如图 4 所示，其中 R_{v} 和 L_{v} 分别是输出虚拟电阻和电感，U_{v} 是由外功率回路计算出的虚拟内电动势，u_{td}、u_{tq} 是共耦点(point of common coupling, PCC)测得的电压在以虚拟内电势 U_{v} 为 d 轴时 dq 旋转坐标系下的 d 轴与 q 轴分量，i_d、i_q 为在 PCC 点测得的电流在同一 dq 坐标系下的 d 轴与 q 轴分量。

考虑到典型虚拟导纳控制方法在虚拟电阻很小的情况下动态性能较差(如存在直流分量)，同时为了不引入虚拟电感带来的电流瞬态分量(如图 4 中与电感参数相关的积分器)，从而避免增加虚拟电阻，仅模拟虚拟电感的稳态特性是一种有效手段。所以本文采用的是虚拟稳态导纳特性的控制策略，即只对导纳的稳态特性进行虚拟，即令 R_{v}=0，可得在 dq 旋转坐标系下变换器输出参考电流指令 $i_{\mathrm{g}d\mathrm{ref}}$ 和 $i_{\mathrm{g}q\mathrm{ref}}$ 为

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{ref}}=\dfrac{1}{\omega L_{\mathrm{v}}}\left(-u_{tq}\right) \\ i_{q\mathrm{ref}}=\dfrac{-1}{\omega L_{\mathrm{v}}}\left(U-u_{td}\right) \end{cases} \tag{9}$$

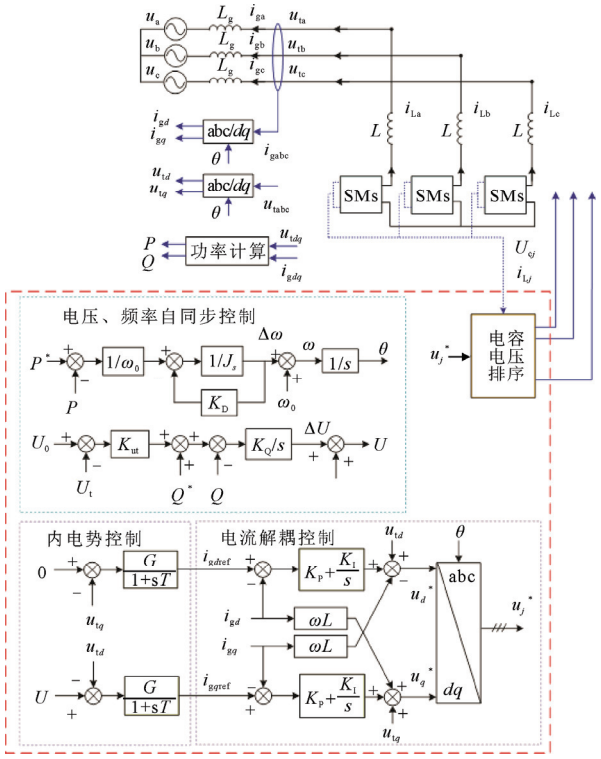


图 3 ESVG 的整体控制策略和框图

Fig.3 Control diagram of ESVG

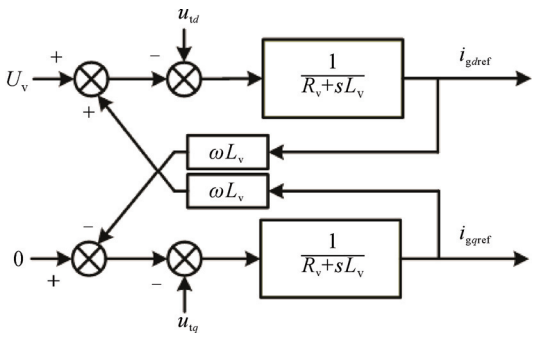


图 4 基于虚拟导纳的电压环控制框图

Fig.4 Block diagram of voltage loop control based on virtual admittance

同时，为滤除电压高频谐波对电流给定的影响，在式(9)基础上增加一个一阶滤波器，且其带宽的设计不受虚拟电阻的影响。最后得出本文所采用的内电势实现方式如图 5 所示。

该内电势实现方式下，变换器的端口电流注入依赖于其端口电压特性，电流参考值需经过限幅环节才能传递给内环进行控制，其表达式为

$$i_{\mathrm{g}d(q)\mathrm{ref}}=\begin{cases} i_{\mathrm{g}d(q)}^{*}, & \left|i_{\mathrm{g}d(q)}^{*}\right|\le I_{\mathrm{lim}} \\ \dfrac{I_{\mathrm{lim}}}{\left|i_{\mathrm{g}d(q)}^{*}\right|}i_{\mathrm{g}d(q)}^{*}, & \left|i_{\mathrm{g}d(q)}^{*}\right|>I_{\mathrm{lim}} \end{cases} \tag{10}$$

因此，即使在电流限幅下，ESVG 仍然具有经过虚拟电抗后内电势的端口特性，有利于维持故障前后的短路电流特性。同时，相较传统电压中环的内电势实现方法，该方法适用于无交流侧滤波电容的变换器系统。

根据上述生成的电流参考，电流环采用经典的矢量解耦控制，其控制框图如图 3 所示。

1.5　ESVG 相内电压均衡和调制策略

ESVG 采用级联 H 桥的结构，子模块数量较多，可以采用最近电平调制(nearest level modulation, NLM)以获得较高的等效开关频率和较好的输出波形质量[17]。同时，NLM 调制策略通过对电容电压进行排序决定每相开通和关断的子模块，可以实现相内超级电容模块电压的自均衡[18]。图 6 为最近电平调制的调制信号生成示意图，其中 n_{jr} 为 j 相桥臂所需投入的子模块个数(j=a,b,c)。

1.6　ESVG 的充电控制策略

在电网频率波动结束恢复至额定范围内后，应对各模块内的超级电容进行能量控制，即再充电控制。通过设置并网有功指令 P^*，使系统以恒定的有功功率运行。此时 ESVG 的虚拟转子运动方程为

$$J\omega\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=P^*-P_\mathrm{e}-K_\mathrm{D}\omega\left(\omega-\omega_0\right) \tag{11}$$

由于电网频率恢复正常，推出并网有功指令 P^* 与输出有功 P_e 相等。则输出有功、系统损耗 P_l、超级电容侧的充电功率 P_charge 关系如下

$$-P_\mathrm{e}=P_\mathrm{l}+P_\mathrm{charge} \tag{12}$$

系统损耗主要由变流器损耗与超级电容等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)损耗构成。其中级联 H 桥变流器效率约为 99%；单体超级电容 ESR 阻值较小，但由于每个超级电容模块中集成单体数量较多，因此超级电容损耗不可忽略。经计算可知，当储能型静止无功发生器以 10 MW 的额定功率进行充电时，其超级电容侧的 ESR 最大损耗功率小于 0.3 MW(每相 46 个子模块全部投入时)。且伴随随着超级电容电压 U_c 的提升，以 NLM 为调制方式的 ESVG 周期内投入子模块数目减少，损耗功率会进一步降低。因此，本文认为充电过程中的充电功率 P_charge 与并网有功指令 P^*相等。

当超级电容模块充电达到指定容量时，ESVG 并网有功指令恢复为 0，不再从电网吸收有功功率。

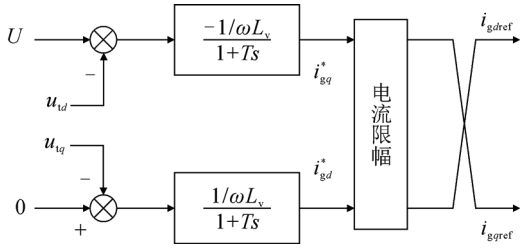


图 5　基于动态内电势下垂的控制框图

Fig.5　Control block diagram of dynamic inner-electromotive-force droop

2　ESVG 主要参数整定方法

本章对基于自同步电压源控制下的 ESVG 线性化模型进行关键参数整定，具体过程如下所述。

2.1　ESVG 线性化模型

为设计控制系统的参数，需要求取 ESVG 并网运行时的稳态工作点，随后建立 ESVG 在电网频率、电压波动时输出响应的小信号模型。系统稳态工作点推导见附录 A，小信号模型详细推导过程见附录 B。ESVG 在 s 域内的动态小信号模型如图 7 所示。

根据图 7 可推导出 ESVG 参与电网调频的惯量响应动态模型为

$$\frac{\hat{P}_\mathrm{e}(s)}{\hat{\omega}_\mathrm{g}(s)}=-\frac{3J\omega_\mathrm{n}U_\mathrm{n}^2/Xs+3K_\mathrm{D}\omega_\mathrm{n}U_\mathrm{n}^2/X}{J\omega_\mathrm{n}s^2+K_\mathrm{D}\omega_\mathrm{n}s+3U_\mathrm{n}^2/X} \tag{13}$$

式中：X 为虚拟电抗 L_v 和并网滤波电感 L 工频下的阻抗值之和；U_n 为电网侧电压有效值。

ESVG 参与电网调压的无功动态模型为

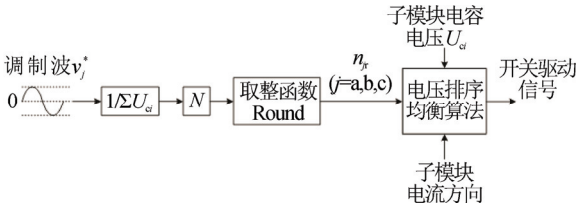


图 6　NLM 调制信号产生示意图

Fig.6　Schematic diagram of NLM modulation signal generation

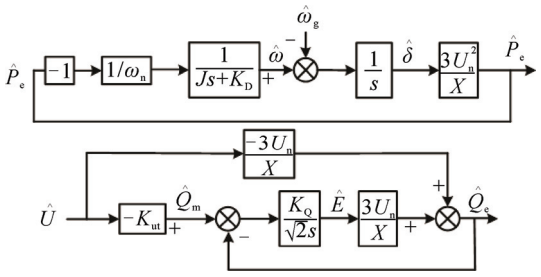


图 7　ESVG 小信号模型

Fig.7　Small signal model of ESVG

$$\frac{\hat{Q}_{\mathrm{e}}(s)}{\hat{U}(s)}=-\frac{3\sqrt{2}U_{\mathrm{n}}s+3K_{\mathrm{ut}}K_{\mathrm{Q}}U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{2}Xs+3K_{\mathrm{Q}}U_{\mathrm{n}}} \tag{14}$$

2.2 J和 K_{D}的参数整定

本文将在考虑频率环动态性能的基础上进行参数整定。根据文献[19]可知，当系统承受不平衡功率时，同步机的电磁转矩大于机械转矩会使电网频率开始下降，同步发电机以及调相机提供惯量支撑功率，此过程在 0.1 s 前开始。因此设置 ESVG 参与电网频率变化的响应时间 t_{sf} 小于 0.1 s。

根据图 7 可知，ESVG 的频率环闭环传递函数 $T_{\mathrm{f}}(s)$为

$$T_{\mathrm{f}}(s)=\frac{\hat{\omega}(s)}{\hat{\omega}_{\mathrm{g}}(s)}=\frac{3U_{\mathrm{n}}^2/(X\omega_{\mathrm{n}})}{Js^2+K_{\mathrm{D}}s+3U_{\mathrm{n}}^2/(X\omega_{\mathrm{n}})} \tag{15}$$

显然 ESVG 频率环闭环传递函数为典型的二阶系统，其自然振荡角频率 ω_{nf} 以及阻尼比 ζ_{f} 表达式如下

$$\begin{cases}\omega_{\mathrm{nf}}=\sqrt{3U_{\mathrm{n}}^2/\left(J\omega_{\mathrm{n}}X\right)}\\ \zeta_{\mathrm{f}}=0.5K_{\mathrm{D}}\sqrt{\omega_{\mathrm{n}}X/\left(J3U_{\mathrm{n}}^2\right)}\end{cases} \tag{16}$$

根据文献[16]可知，虚拟电抗取值一般为 0.1~0.3 倍的逆变器阻抗值，本文取 10 mH。

为了使 ESVG 参与电网调频的动态过程具有较快的响应速度，同时保证输出阻尼，以免出现频率和有功功率振荡，设置频率环为过阻尼环节，即令 $\zeta_{\mathrm{f}}>1$。

定义过阻尼二阶系统时间常数 T_1 和 T_2 如下

$$\begin{cases}T_1=\dfrac{1}{\omega_{\mathrm{nf}}\left(\zeta_{\mathrm{f}}-\sqrt{\zeta_{\mathrm{f}}^2-1}\right)}\\ T_2=\dfrac{1}{\omega_{\mathrm{nf}}\left(\zeta_{\mathrm{f}}+\sqrt{\zeta_{\mathrm{f}}^2-1}\right)}\end{cases} \tag{17}$$

为便于求取 t_{sf}，使 $T_1\geq 4T_2$，则过阻尼二阶系统可以等效为一阶系统，因此可以认为 $t_{\mathrm{sf}}=3T_1$(误差不超过 10%)。本文令 $t_{\mathrm{sf}}\leq 0.1$ s，结合式(17)可得

$$\zeta_{\mathrm{f}}-\sqrt{\zeta_{\mathrm{f}}^2-1}>\frac{30}{\omega_{\mathrm{nf}}} \tag{18}$$

本文令 $\omega_{\mathrm{nf}}=100\pi$ rad/s，由式(15)可得 J=12 997.7。

根据式(17)绘制 T_1 和 $4T_2$ 关于 ζ_{f} 的函数曲线，结果如图 8 所示。根据式(18)绘制关于 ζ_{f} 的函数 $f\left(\zeta_{\mathrm{f}}\right)$，的函数图像，结果如图 9 所示。

将图 8、图 9 中的 ζ_{f} 可行域取交集。可推出：$1.252<\zeta_{\mathrm{f}}<1.8$，进而可得 K_{D} 的取值范围为

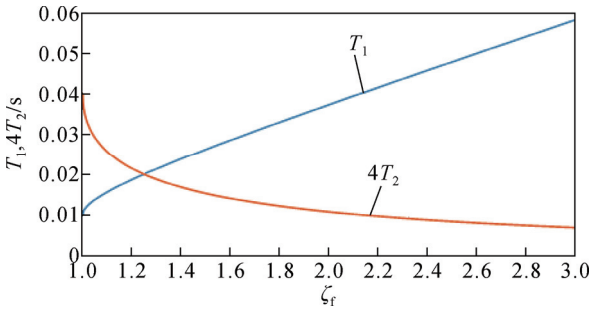


图 8 T_1、T_2 关于 ζ_{f} 的函数曲线

Fig.8 Function curves of T_1 and T_2 with ζ_{f}

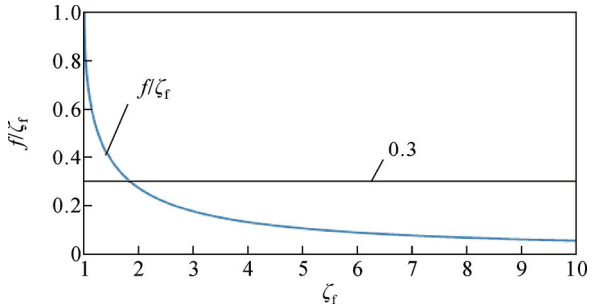


图 9 函数 $f\left(\zeta_{\mathrm{f}}\right)$ 曲线

Fig.9 Curve of $f\left(\zeta_{\mathrm{f}}\right)$

$$\begin{cases}K_{\mathrm{D}}>2.5\sqrt{3JU_{\mathrm{n}}^2/\left(\omega_{\mathrm{n}}X\right)}\\ K_{\mathrm{D}}<3.6\sqrt{3JU_{\mathrm{n}}^2/\left(\omega_{\mathrm{n}}X\right)}\end{cases} \tag{19}$$

即 $1.836\ 218\ 5\times10^5<K_{\mathrm{D}}<2.639\ 930\ 7\times10^5$。

本文 ESVG 的额定容量选定为 S_{n}=30 MW(10 s 内持续输出的最大功率)。根据式(13)可得，电网频率变化量与 ESVG 输出功率关系为

$$\frac{\Delta P_{\mathrm{e}}}{\Delta\omega_{\mathrm{g}}}=K_{\mathrm{D}}\omega_{\mathrm{n}} \tag{20}$$

假设当配电网的频率变化 1 Hz 时，输出有功功率变化 100%，则有

$$K_{\mathrm{D}}\omega_{\mathrm{n}}=\frac{30\times10^6}{2\pi}=4.774\ 648\times10^6\ \mathrm{W/rad} \tag{21}$$

即 $K_{\mathrm{D}}=1.519\ 817\ 55\times10^4$。

为了保证 ESVG 参与电网惯量响应具有良好的响应速度，K_{D} 需满足式(19)所示的范围，K_{D} 最终选取为 2×10^5。

考虑到在该参数整定方法下，系统为保证快速响应电网频率变化以及阻尼输出功率振荡而选取了较大的 K_{D}，这可能会导致系统在一次调频过程中对外持续输出有功功率，从而引发 ESVG 过放的问题。因此在 ESVG 并网运行阶段可以采用较大的 K_{D}，从而实现快速并网运行。

而在系统稳定运行后，在有功–频率环节中的阻尼项串联微分项。通过暂态补偿的形式改变阻尼系数 K_D，增大有功功率环惯性时间常数，延长系统输出角频率随有功功率变化的动态过渡时间；并降低在低频段(静态)的系统增益，以消除较高阻尼系数 K_D 对稳态误差的影响[20]。

2.3 K_Q 和 K_{ut} 的参数整定

电网电压波动的情况下，ESVG 能主动参与电网电压控制。当动态过程结束后，ESVG 输出无功功率变化量 ΔQ_e 与系统电压变化量 ΔU 之间存在如下关系

$$\frac{\Delta Q_e}{\Delta U}=-K_{ut} \tag{22}$$

本文设计当配电网电压变化 10%时，储能系统输出无功功率变化 100%，则有

$$K_{ut}=\frac{\sqrt{3}\times 30\times 10^6}{35\times 10^3\times\sqrt{2}\times 10\%}=10\ 498\ \text{VA/V} \tag{23}$$

《电网运行准则》规定电网调压的响应时间应明显小于系统调频的响应时间[21]。为了使 ESVG 参与电网调压的动态过程与电网电压控制相配合，ESVG 参与电网调压的响应时间 t_{sv}<0.2 s。其参与电网调压的响应时间 t_{sv} 约等于无功环的响应时间 t_{sQ}。

根据图 7 可推出 ESVG 无功环闭环传递函数 $T_Q(s)$为

$$T_Q(s)=\frac{1}{T_q s+1} \tag{24}$$

式中：$T_Q(s)$为典型一阶环节；T_q 为一阶环节时间常数，$T_q=\sqrt{2}X/\left(3K_Q U_n\right)$，该时间常数体现 ESVG 模拟同步发电机励磁系统的惯性。

由于无功环为典型一阶环节，因此有 $t_{sQ}=3T_q$ <0.2 s，整理得

$$K_Q>\frac{5\sqrt{2}X}{U_n}=3.298\times 10^{-3} \tag{25}$$

无功环开环增益为 $G_Q(s)=1/(T_q s)$，设无功环开环截止频率为 f_{cQ}，根据截止频率处开环增益幅值为 1 dB 可得

$$\left|G_Q\left(\mathrm{j}2\pi f_{cQ}\right)\right|=\frac{1}{T_q}\left|\frac{1}{\mathrm{j}2\pi f_{cQ}}\right|=1 \tag{26}$$

整理得

$$K_Q=\frac{2\sqrt{2}\pi f_{cQ}X}{3U_n} \tag{27}$$

为了抑制瞬时无功功率中 2 倍工频脉动量对输出电压幅值的影响，选取无功环的截止频率 f_{cQ} 小于 2 倍工频的 1/10，即 f_{cQ}<10 Hz，可得

$$K_Q<\frac{20\sqrt{2}\pi X}{3U_n}=1.3814\times 10^{-2} \tag{28}$$

K_Q 的取值范围为 3.298×10^{-3}~1.3814×10^{-2}，本文取 K_Q=0.01。

3　仿真分析

为了验证所提控制方法下 ESVG 的有效性，本文通过 Matlab/Simulink 软件，首先基于图 1 所示的系统构建 ESVG 并网仿真模型，随后构建了同步发电机、负荷以及 ESVG 构成的简化并网系统仿真模型。仿真模型 1 中电网采用理想电压源等效，仿真模型 2 中电网采用单同步机等效。同步机容量为 900 MW，负载为 100 MW。ESVG 额定有功功率为 30 MW(10 s 内)、无功功率为 30 MVA(10 s 内)。具体参数如表 2 所示。

3.1 ESVG 自同步过程验证

通过搭建仿真模型 1 所示的理想电网与 ESVG 所构成的系统，ESVG 的并网有功/无功功率指令分别为 0 W/0 VA，超级电容模块的初始电压为 980 V，运行过程中 ESVG 输出电压、电流波形如图 10 所示。输出的功率和超级电容模块电压以及输出电压频率波形如图 11 所示。可知，由于超级电容模块在电网正常运行过程中无有功功率和无功功率输出，因此超级电容模块电压保持 980 V 不变。

根据仿真结果可知，本文提出的 ESVG 所采用的模拟同步调相机自同步电压源控制策略可以实现在无锁相环下频率、相角的自同步功能，且正常运行时与电网无功率交换，符合同步调相机并网特性。

3.2 ESVG 自主惯量响应和电压支撑能力验证

针对风场中有功功率缺失导致的频率波动问

表 2　ESVG 及简化电网参数

Table 2　Parameters of ESVG and the simplified power grid

类别	参数	数值
ESVG	每相子模块数	46
	超级电容模块容值/F	8.26
	超级电容模块 ESR/mΩ	90.5
	超级电容额定电压/V	980
	交流侧电感值 L/mH	20
	网侧线电压有效值/kV	35
	10 s 内最大输出有功功率 P/MW	30
	10 s 内最大输出无功功率 Q/MVA	30
	无功支撑能力 Q_n/MVA	10
简化电网	同步发电机容量/MVA	900
	额定交流电压/kV	20
	负载容量/MVA	100

题以及无功变化导致的电网电压波动问题，本节对本文所提出的惯量响应策略以及无功补偿措施进行了验证。

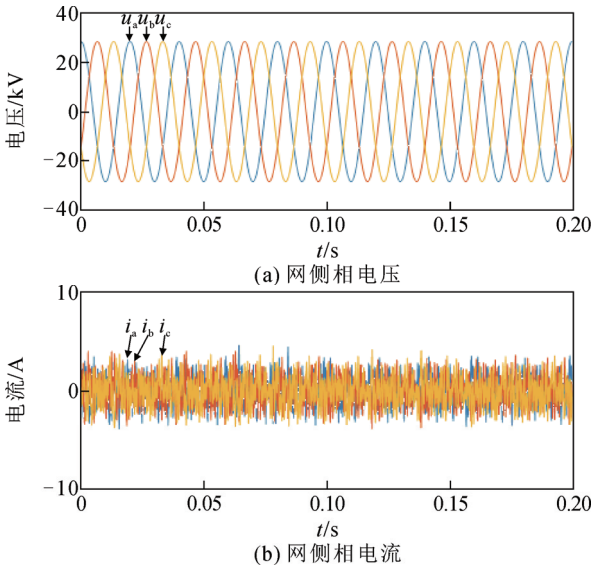


图 10 ESVG 输出仿真结果

Fig.10 Simulation results of outputs from ESVG

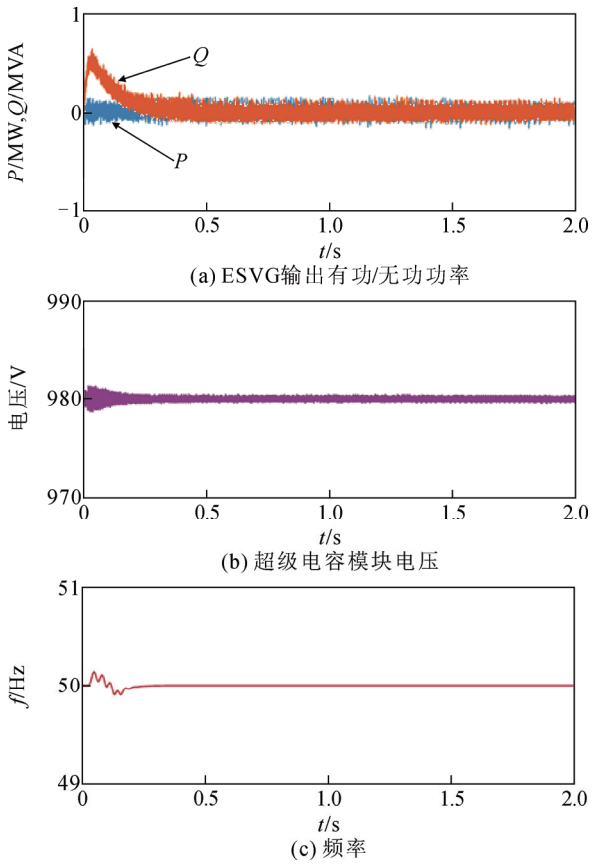


图 11 ESVG 输出功率、超级电容电压、频率仿真结果

Fig.11 Simulation results of system output power, supercapacitor voltage and output AC voltage frequency

当电网频率在 1 s 发生波动时，电网频率由 50 Hz 以 0.1 Hz/s 的速度跌落到 49.9 Hz，此时的 ESVG 频率与电网频率如图 12 所示。

电网频率下降过程中，ESVG 主动输出有功功率，有功功率大小与自身输出电压频率和电网频率有关，如图 13 所示。

当电网电压在 2 s 发生跌落时，电网电压幅值标幺值由 1 瞬间跌落至 0.9，3 s 后电网电压标幺值恢复 1，此时的 ESVG 输出电压、电流波形见图 14。

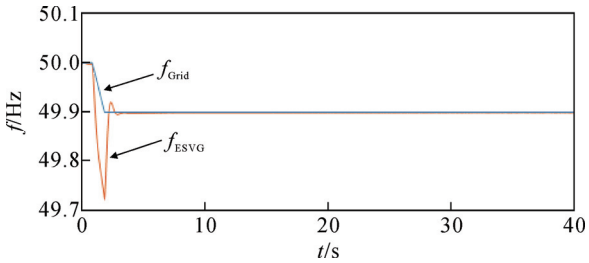


图 12 电网频率与 ESVG 频率

Fig.12 Grid frequency and ESVG frequency

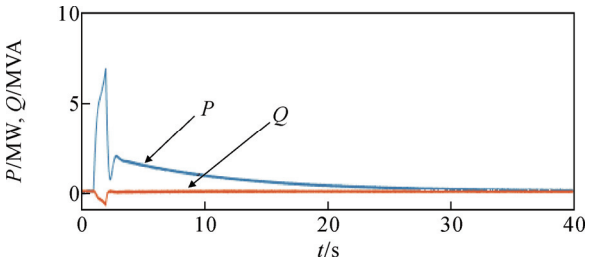


图 13 ESVG 输出有功和无功功率

Fig.13 Output power of ESVG

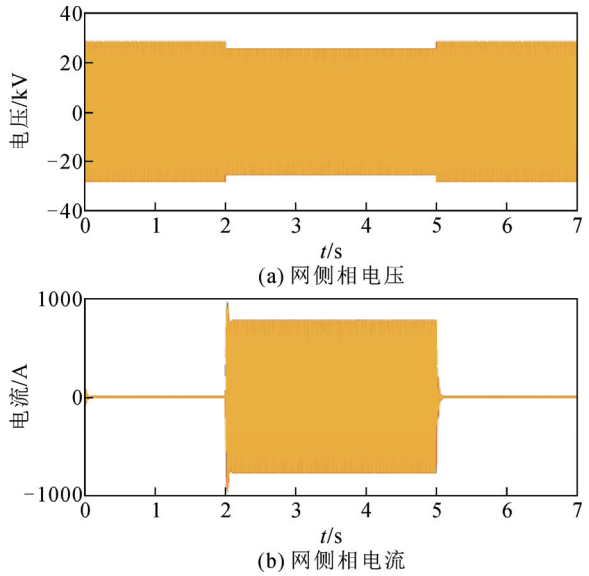


图 14 电网侧电压与电流波形仿真结果

Fig.14 Simulation results of system grid voltages and grid currents

ESVG 根据无功−下垂控制策略可得输出 30 MVA 的无功功率，ESVG 无功补偿输出功率波形如图 15 所示。

超级电容的电压则由于系统无功功率的释放而波动，以 a 相第 1 个超级电容模块电压为例，得到无功输出时超级电容电压如图 16 所示。

超级电容电压的波动处于额定运行状态下波动范围，因此并不会对超级电容寿命产生显著影响，相比于无法承受长时间频繁充放电的锂电池，具有显著的优势。

3.3　ESVG 总能量和能量均衡控制

考虑到ESVG以30 MW的恒有功功率放电10 s后超级电容模块电压约为834 V(不考虑损耗的情况下)，同时考虑到变流器损耗以及超级电容附加电阻损耗以及控制策略中的阻尼系数存在一定的功率下垂作用，本文选取 700 V 作为 ESVG 完成惯量响应后的电压初始值，当电网恢复正常后使 ESVG 以恒定功率 10 MW 充电至额定电压。ESVG 充电过程中的电流、功率波形如图 17、18 所示。

超级电容模块中的电压随着功率的提升，其上升速率不断升高，在有功功率达到恒定值时。超级电容模块以恒电流充电模式进行充电，电压以恒定速度上升，以 a 相第 1 个子模块超级电容电压波形为例，其结果如图 19 所示。

采用最近电平逼近调制策略可以使各相子模块的电压实现自均衡，无需进行额外均衡控制，以 a 相第 1—4 个子模块为例，其充电过程中 1~1.04 s 的电压波形如图 20 所示。

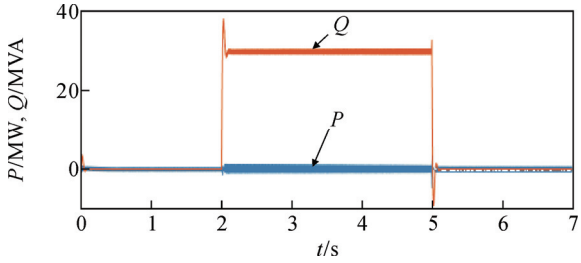


图 15　ESVG 无功补偿输出功率波形

Fig.15　Output power of ESVG during reactive power support

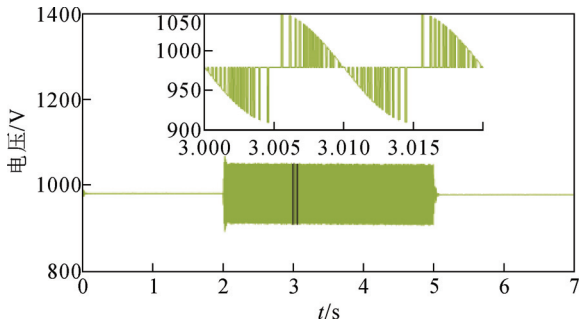


图 16　无功输出时超级电容电压

Fig.16　Supercapacitor voltage during the process of reactive power support

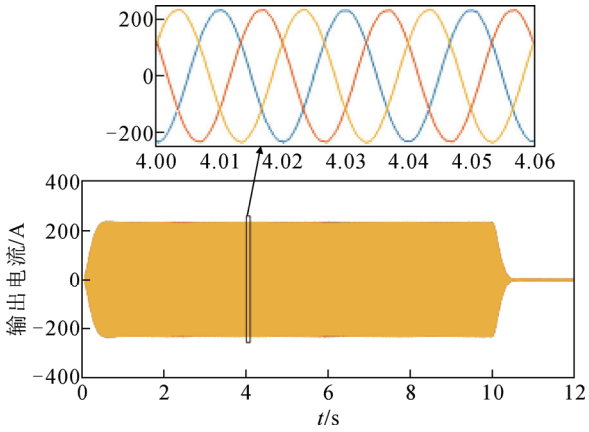


图 17　ESVG 充电电流波形

Fig.17　Charging current waveform of ESVG

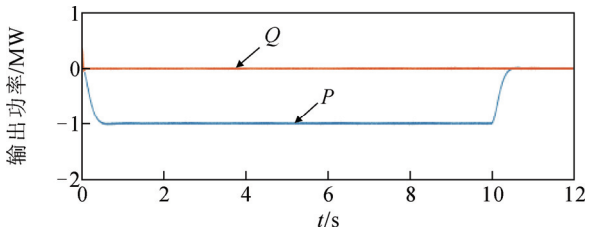


图 18　ESVG 充电功率波形

Fig.18　Output power of ESVG during charging

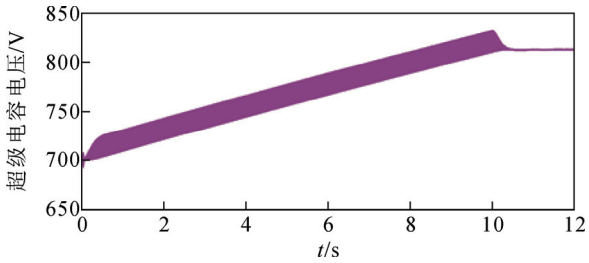


图 19　超级电容充电电压波形

Fig.19　Supercapacitor voltage waveform during charging

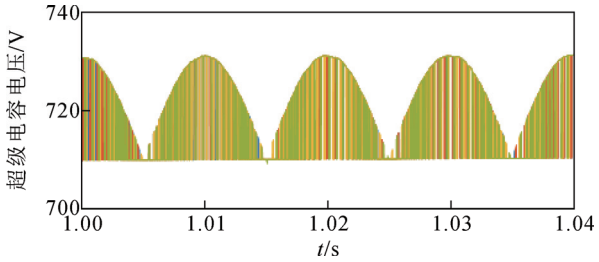


图 20　各超级电容子模块电压波形

Fig.20　Supercapacitor voltage waveforms of different modules in the same phase

3.4 ESVG 并网系统案例分析

为进一步验证本文所提 ESVG 在面对负荷突变时的惯量支撑能力，搭建了一个包含同步发电机、ESVG 与负载的简易电网模型，如图 21 所示。

负荷在 5 s 时由 100 MW 突然增加至 110 MW，分别对含有 ESVG 以及不含 ESVG 的简易电网系统进行仿真验证，可得同步发电机的频率变化如图 22 所示。

ESVG 可以减轻负载发生变化时引起的电网频率波动问题，通过释放超级电容中的能量，可以为风电场提供一定的惯量。仿真结果验证了本文所提惯量响应策略的有效性。

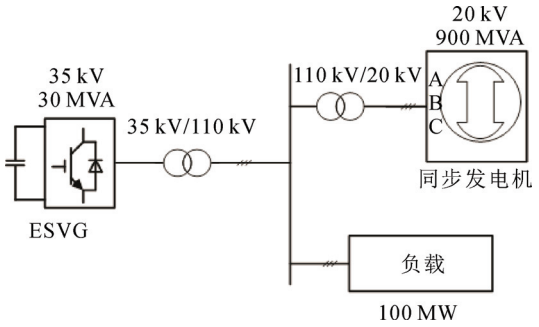


图 21 含 ESVG 的简易电网结构图

Fig.21 Circuit configuration of the power grid system

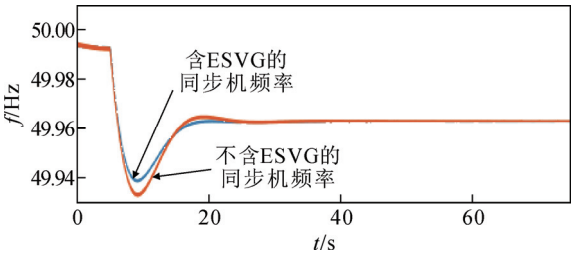


图 22 负荷突变时同步发电机的频率变化

Fig.22 Simulation results of SG frequency change due to the load flow

4 结论

1）采用基于级联 H 桥的模块化多电平变换器系统，可以灵活应对多种接入电压等级和容量需求。该链式结构下，采用超级电容作为 H 桥子模块储能元件，与采用电池作为储能元件相比，可在不增加脉动功率消除电路的情况下，兼具有功功率和无功功率释放功能。

2）基于内电势下垂+环形电流限幅实现的自同步电压源控制方法，不仅实现了频率和电压响应的自主响应和支撑，而且可以维持装备故障限流控制期间的电压源特性。相较于电流源型控制方法，满足新型电力系统对静止型电力电子装置快速惯量响应和电压支撑的需求。

3）相比于以电池为储能媒介的储能功率变换器系统，该 ESVG 更符合大斜率暂态频率支撑对功率高倍率、快速释放的需求，以及频繁阻尼频率波动的需求；同时，兼具前述无功电压暂态支撑能力。

此外，本文提出的技术方案只需对风场现有 SVG 进行储能元件集成和算法迭代，就能实现对电网惯量和电压的支撑，从而提升新能源场站的友好接入能力，在工程上具有一定推广价值，也为新型电力系统的构建提供了一种新能源电源侧的解决方案。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 赵恩盛，韩 杨，周思宇，等. 微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(4)：1413-1427.
ZHAO Ensheng, HAN Yang, ZHOU Siyu, et al. Review and prospect of inertia and damping simulation technologies of microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1427.

[2] 梁 恺，彭晓涛，秦世耀，等. 基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(8)：2628-2640.
LIANG Kai, PENG Xiaotao, QIN Shiyao, et al. Study on synergetic control strategy for optimizing frequency response of wind farm augmented with energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2628-2640.

[3] 蔡葆锐，杨 蕾，黄 伟. 基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(15)：169-177.
CAI Baorui, YANG Lei, HUANG Wei. Frequency coordination control of a variable speed wind turbine based on inertia/droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 169-177.

[4] YANG R X, SHI G, CAI X, et al. Autonomous synchronizing and frequency response control of multi-terminal DC systems with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2504-2514.

[5] 陈鹏伟，戚陈陈，陈 新，等. 附加频率控制双馈风电场频率响应特性建模与参数辨识[J]. 电工技术学报，2021，36(15)：3293-3307.
CHEN Pengwei, QI Chenchen, CHEN Xin, et al. Frequency response modeling and parameter identification of doubly-fed wind farm with additional frequency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3293-3307.

[6] 边晓燕，张菁娴，丁 炀，等. 基于 DFIG 虚拟惯量的微电网双维自适应动态频率优化控制[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1489-1498.
BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, DING Yang, et al. Double layer adaptive dynamic frequency optimization control of microgrid based on DFIG virtual inertia[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1489-1498.

[7] 张祥宇，朱正振，付 媛. 风电并网系统的虚拟同步稳定分析与惯量优化控制[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2922-2932.
ZHANG Xiangyu, ZHU Zhengzhen, FU Yuan. Virtual synchronous

stability analysis and optimized inertia control for wind power grid-connected system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2922-2932.

[8] 王德胜，颜湘武，贾焦心，等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(6)：2164-2174.
WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2164-2174.

[9] 刘中建，周　明，李昭辉，等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备，2021，41(12)：1-11，53.
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 1-11, 53.

[10] 姜惠兰，蔡继朝，肖　瑞，等. 一种提高系统频率响应特性的风储协调控制策略[J]. 电力自动化设备，2021，41(7)：44-51.
JIANG Huilan, CAI Jizhao, XIAO Rui, et al. A wind-storage coordinated control strategy for improving system frequency response characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 44-51.

[11] 刘梦昕. 含 SVG 双馈风电场并入弱电网的宽频带振荡研究及其抑制技术[D]. 兰州：兰州理工大学，2021.
LIU Mengxin. Research on wide-band oscillation of doubly-fed wind farm containing SVG into weak grid and its suppression technology[D]. Lanzhou, China: Lanzhou University of Technology, 2021.

[12] 张　扬，林卫星，邓才波，等. 星形链式 STATCOM 的冗余容错控制算法[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3398-3406.
ZHANG Yang, LIN Weixing, DENG Caibo, et al. Redundant fault-tolerant control algorithm of star-connected cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3398-3406.

[13] 刘　畅，蔡　旭，陈　强. 具有储能功能的链式 STATCOM 研究[J]. 电源学报，2018，16(4)：21-27.
LIU Chang, CAI Xu, CHEN Qiang. Research on cascaded STATCOM with battery energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 21-27.

[14] SPAHIC E, REDDY C P S S, PIESCHEL M, et al. Multilevel STATCOM with power intensive energy storage for dynamic grid stability - frequency and voltage support[C]//IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). London, Canada: IEEE, 2015: 73-80.

[15] 张　芳. 超级电容储能系统效率提升方法研究[D]. 太原：太原理工大学，2021.
ZHANG Fang. Research on the efficiency improvement methods of supercapacitor energy storage system[D]. Taiyuan, China: Taiyuan University of Technology, 2021.

[16] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1062-1073.

[17] 王　昆. 最近电平调制下模块化多电平变换器工频排序平衡方法与故障诊断技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.
WANG Kun. Research on capacitor voltage balancing and failure diagnosis methods of MMC based on fundamental frequency sorting strategy with nearest level modulation[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2020.

[18] 张国荣，韩慧颖，王啸飞，等. 模块化多电平变换器最近电平调制研究[J]. 电测与仪表，2017，54(23)：1-9.
ZHANG Guorong, HAN Huiying, WANG Xiaofei, et al. Research on nearest level modulation for multilevel converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(23): 1-9.

[19] 孙华东，王宝财，李文锋，等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(16)：5179-5191.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5191.

[20] 李志军，贾学岩，王丽娟，等. 基于改进惯量阻尼特性的 VSG 控制策略[J]. 太阳能学报，2021，42(7)：78-85.
LI Zhijun, JIA Xueyan, WANG Lijuan, et al. Improved virtual synchronous generator based on enhanced inertia and damping characteristics[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 78-85.

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电网运行准则：GB/T 31464—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The grid operation code: GB/T 31464—2015[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2015.



张家玮
1998—，男，硕士生
从事模块多电平变换器、储能方面的研究工作
E-mail: m15247763526@163.com

ZHANG Jiawei



蔡　旭(通信作者)
1964—，男，博士，教授，博导
研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制等
E-mail: xucai@sjtu.edu.cn

CAI Xu
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-04-25　在线出版日期　2022-09-15　　编辑　何秋萍

附录 A　稳态工作点求解

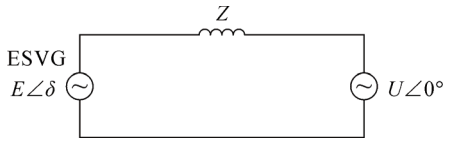


图 A1　ESVG 并网等效电路

Fig.A1　Equivalent circuit of ESVG connected with grid

图 A1 为 ESVG 并网等效电路。Z 为输出阻抗，表达式为：

$$Z = r + \mathrm{j}\omega(L + L_\mathrm{v}) \approx \mathrm{j}\omega(L + L_\mathrm{v}) = \mathrm{j}X \tag{A1}$$

式中：r 为滤波电感的寄生电阻；L 表示变换器与并网点间的并网电抗器；L_v 表示虚拟电感；E 为 ESVG 产生相电压的有效值；U 为并网检测电相电压的有效值；并网变流器桥臂中点基波电压相量为 $E\angle\delta$，ESVG 并网点处电压相量为 $U\angle0°$。忽略电感寄生电阻，上述系统的潮流方程如下

$$\begin{cases} P = \dfrac{3UE}{X}\sin\delta \\ Q = \dfrac{3UE}{X}\cos\delta - \dfrac{3U^2}{X} \end{cases} \tag{A2}$$

由此可得出 ESVG 的稳态工作点为

$$\begin{cases} \delta_0 = \arctan\dfrac{PX}{QX + 3U^2} \\ E_0 = \dfrac{PX}{3U\sin\delta_0} \end{cases} \tag{A3}$$

电网正常运行时调相机无需向电网补充有功/无功功率，因此 ESVG 并网有功指令 P^*、无功指令 Q^*均为 0。

附录 B

根据式(4)—式(7)、式(A2)和式(A3)，将 ESVG 数学模型表达式中的状态变量写为稳态量和小扰动量之和

$$\begin{cases} \delta = \delta_0 + \hat{\delta} \\ \omega = \omega_0 + \hat{\omega} \\ \omega_\mathrm{g} = \omega_{\mathrm{g}0} + \hat{\omega}_\mathrm{g} \\ P_\mathrm{e} = P_{\mathrm{e}0} + \hat{P}_\mathrm{e} \\ E = E_0 + \hat{E} \\ U = U_0 + \hat{U} \\ Q_\mathrm{m} = Q_{\mathrm{m}0} + \hat{Q}_\mathrm{m} \\ Q_\mathrm{e} = Q_{\mathrm{e}0} + \hat{Q}_\mathrm{e} \end{cases} \tag{B1}$$

式中：下标带“0”表示各变量的稳态值；下标带“^”表示相应变量在稳态工作点附近的小扰动。将状态变量代入式(4)—式(7)以及式(A2)和式)A3)，消除其中的稳态分量和二次扰动量，得小信号表达式如式(B2)所示。

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\hat{\delta}}{\mathrm{d}t} = \hat{\omega} - \hat{\omega}_\mathrm{g} \\ J\dfrac{\mathrm{d}\hat{\omega}}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{\hat{P}_\mathrm{e}}{\omega_\mathrm{n}} - K_\mathrm{D}\hat{\omega} \\ \hat{P}_\mathrm{e} = \dfrac{3E_0\sin\delta_0}{X}\hat{U} + \dfrac{3U_0\sin\delta_0}{X}\hat{E} + \dfrac{3U_0E_0\cos\delta_0}{X}\hat{\delta} \\ \dfrac{\mathrm{d}\sqrt{2}\hat{E}}{\mathrm{d}t} = K_\mathrm{Q}\left(\hat{Q}_\mathrm{m} - \hat{Q}_\mathrm{e}\right) \\ \hat{Q}_\mathrm{m} = -\sqrt{2}K_\mathrm{ut}\hat{U} \\ \hat{Q}_\mathrm{e} = \dfrac{3E_0\cos\delta_0 - 6U_0}{X}\hat{U} + \dfrac{3U_0\cos\delta_0}{X}\hat{E} - \\ \dfrac{3U_0E_0\sin\delta_0}{X}\hat{\delta} \end{cases} \tag{B2}$$

将稳定运行工作点代入，可得 ESVG 在 s 域内的动态小信号模型表达式为

$$\begin{cases} s\hat{\delta}(s) = \hat{\omega}(s) - \hat{\omega}_\mathrm{g}(s) \\ (Js + K_\mathrm{D})\hat{\omega}(s) = -\hat{P}_\mathrm{e}(s)/\omega_\mathrm{n} \\ \hat{P}_\mathrm{e}(s) = \dfrac{3U_\mathrm{n}^2}{X}\hat{\delta}(s) \\ \sqrt{2}\hat{E}(s) = \dfrac{K_Q}{s}\left(\hat{Q}_\mathrm{m}(s) - \hat{Q}_\mathrm{e}(s)\right) \\ \hat{Q}_\mathrm{m} = -\sqrt{2}K_\mathrm{ut}\hat{U} \\ \hat{Q}_\mathrm{e}(s) = -\dfrac{3U_\mathrm{n}}{X}\hat{U}(s) + \dfrac{3U_\mathrm{n}}{X}\hat{E}(s) \end{cases} \tag{B3}$$