

含 SVG 的光伏场站阻抗建模与高频振荡风险分析

徐韵扬,周 波,孙昕炜,王 曦

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:基于级联 H 桥电路的静止无功发生器(SVG)具有快速的动态无功支撑能力,是大型光伏场站常用的无功补偿设备。同时,由于 SVG 的控制带宽相对较大,控制作用所影响频段范围相对较宽,SVG 在千赫兹以上的高频段仍可能具有负阻特性,使得含 SVG 的光伏场站面临更高频段范围的高频振荡风险。然而,现有研究重点关注新能源在 2.5 Hz~1 kHz 频段范围内的阻抗特性,无法评估 1 kHz 以上的高频振荡风险。同时,多种高频段附加控制策略和多种运行方式使得光伏场站的高频振荡分析进一步复杂化。首先,围绕含 SVG 的光伏场站高频振荡问题,建立了计及多类型附加控制策略影响下光伏机组和 SVG 的高频通用阻抗模型;进而,深入分析了光伏场站的高频段阻抗特性及其高频段负阻尼的影响因素,提出了含 SVG 的光伏场站面临的典型高频振荡风险;最后,针对四川某光伏场站开展电磁暂态仿真,对所做研究内容进行了验证。

关键词:光伏场站; SVG; 阻抗稳定性分析; 阻抗建模; 高频振荡; 振荡抑制策略

中图分类号:TM 615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)04-0023-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240404

Impedance Modeling and Risk Analysis of High Frequency Oscillations of Photovoltaic Stations with Static Var Generator

XU Yunyang, ZHOU Bo, SUN Xinwei, WANG Xi

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The static var generator (SVG) is based on a cascaded H-bridge circuit, and has fast dynamic reactive power support capability, which is commonly used as a reactive power compensation equipment in large photovoltaic (PV) stations. Due to the large control bandwidth of SVG, the affected frequency range is relatively wide, SVG can still have negative resistance characteristics in high frequency range above kHz, which makes PV stations with SVG face the risk of high frequency oscillations in the higher frequency range. However, the existing researches focus on the impedance characteristics of renewables from 2.5 Hz to 1 kHz, which cannot evaluate the risk of high frequency oscillations above 1 kHz. Meanwhile, various high frequency additional control strategies and a variety of operating conditions make the analysis of high frequency oscillations of PV stations further complicated. So the high-frequency universal impedance model of PV units and SVG is established considering the influence of various additional control strategies. Furthermore, the high frequency impedance characteristics and the influence factors of high frequency negative damping of PV stations are analyzed, and the typical high frequency oscillation risk of PV stations with SVG is proposed. Finally, the electromagnetic transient simulation of a PV station in Sichuan is carried out to verify the proposed research contents.

Key words: photovoltaic station; static var generator; impedance-based stability analysis; impedance modeling; high frequency oscillation; oscillation suppression strategy

0 引言

在新型电力系统建设背景下^[1-2],光伏发电等新能源装机容量持续快速增加,新能源接入引发的宽频振荡问题受到了广泛关注。其中,高频振荡问题是指振荡频率分布在数百赫兹至数千赫兹高频段范围内的宽频振荡问题。例如,文献[3]报道了江苏某海上风电场经柔性直流并网工程中出现的 321 Hz 高频振荡事件;文献[4]提出了德国北海海上风电场经高压直流送出时存在高达 1000 Hz 的高频振荡风险;文献[5]报道了胡杨河地区某含静止无功发生器(static var generator, SVG)的光伏场站多次出现 2500 Hz 左右的高频振荡问题,导致站内母线过压,造成站内大量设备损坏,严重影响光伏场站及其所接入电网的安全稳定运行。

阻抗稳定性分析方法通过获得研究对象系统的阻抗模型,利用阻抗稳定性判据判断该系统的小信号稳定性^[6],是一种研究宽频振荡问题的有效方法,已在学术研究与工程中大量应用。文献[7-9]分别建立了计及频率耦合特性下光伏逆变器、直驱风机和双馈风机的阻抗模型,并分析了其并网稳定性。文献[10]建立了 SVG 的序阻抗模型,并研究了含 SVG 的直驱风场次/超同步振荡风险。文献[11]提出了风电场阻抗特性评估规范,并提出宜对风电场 2.5~1000 Hz 频段范围内的阻抗特性开展评估。

中高电压等级的 SVG 通常采用级联 H 桥电路,级联 H 桥电路的模块化结构使得 SVG 具有数十赫兹的高等效开关频率。同时,为实现 SVG 的快速动态无功支撑能力,SVG 的控制带宽通常比普通光伏逆变器更大,控制作用影响频段范围更宽,可能使 SVG 在千赫兹以上的高频段仍具有负阻特性,从而使其面临更高频段范围的高频振荡风险。然而,现有阻抗稳定性分析研究^[6-11]重点关注新能源在 2.5~1000 Hz 频段范围内的阻抗特性,无法适用于 SVG 设备造成的千赫兹以上高频振荡风险分析。因此,需要建立适用于千赫兹以上频段的 SVG 与光伏机组阻抗模型。

为改善光伏机组、SVG 等电力电子设备在高频段的阻抗特性,不同厂家提出了多种高频段附加控制策略^[12],使得含 SVG 的光伏场站高频振荡问题进一步复杂化。同时,现有 SVG 及光伏机组的阻抗

模型已较为复杂,若进一步考虑多种附加控制策略的阻抗塑造影响,其模型复杂程度难以满足工程应用需求。因此,还需在考虑多种附加控制策略的影响下,建立一种结构简单、适应工程应用需求的高频通用阻抗模型。

为此,下面围绕光伏场站高频振荡问题,开展含 SVG 的光伏场站阻抗建模与高频振荡风险分析工作。首先,建立了多类型高频段附加控制下光伏机组和 SVG 的高频通用阻抗模型;进而,深入分析了光伏场站的高频段阻抗特性及其高频段负阻尼的影响因素,提出了含 SVG 的光伏场站面临的典型高频振荡风险;最后,针对四川某光伏场站开展电磁暂态仿真,对所做研究内容进行了验证。

1 光伏场站高频阻抗建模

四川某光伏场站等效拓扑结构如图 1 所示,包含 21 条汇集电缆与 21 台等效光伏机组,6 台 30 Mvar 的级联 H 桥型 SVG 分别并联在 6 条 35 kV 母线侧,光伏场站经 220 kV 送出线与外部电网相连。下面将分别针对光伏场站的光伏机组和 SVG 进行阻抗建模,并获得其高频简化阻抗模型。

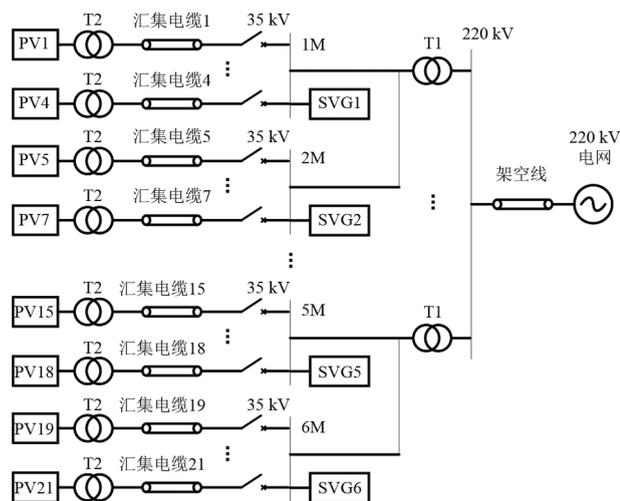


图 1 四川某光伏电站拓扑结构

1.1 光伏机组的阻抗模型

光伏机组通过光伏逆变器与电网相连,其阻抗模型可以等价为光伏逆变器的阻抗模型。采用典型矢量控制的光伏逆变器拓扑结构与控制框图如图 2 所示。其中: $v_{a,b,c}$ 、 $i_{a,b,c}$ 分别为并网点三相电压、电流; v_{ia} 、 v_{ib} 和 v_{ic} 为逆变器三相输出端口电压; V_{dc} 为直流电

压; Z_f 为滤波支路阻抗; θ_{PLL} 为锁相环输出角度。

根据图 2 所示的光伏逆变器主电路拓扑结构与控制框图,采用谐波线性化方法^[14],对光伏逆变器主电路和控制系统进行小信号建模,可以得到光伏逆变器的阻抗模型表达式。具体推导过程可以参考文献[7],在此不再重复。

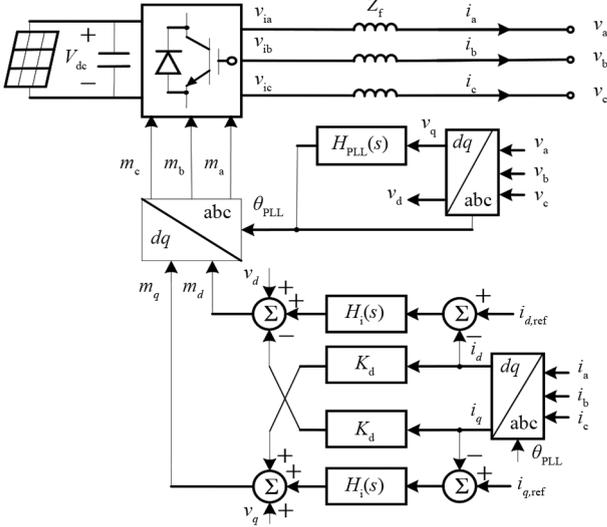


图 2 光伏逆变器拓扑结构与控制

根据频率耦合产生机理,锁相环非线性特性和直流动态特性会导致光伏逆变器产生频率耦合,因此频率耦合特性的影响范围也主要集中在锁相控制带宽与直流电压控制带宽范围内。同时,光伏逆变器的锁相环、直流电压外环与功率外环控制带宽通常相对较小,主要影响逆变器次/超同步频段的阻抗特性,在研究高频振荡问题时可以忽略。

因此,可以对文献[7]中光伏逆变器阻抗模型进行简化,得到适用于描述光伏逆变器高频段阻抗特性的简化模型。

$$Z_{pv}(s) = \frac{Z_f(s) + K_m V_{dc} H_{fi}(s) H_i(s) G_d(s)}{1 - K_m V_{dc} H_{fv}(s) G_d(s)} \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; K_m 为调制系数; $Z_f(s)$ 为滤波支路阻抗; $H_i(s)$ 为电流控制传递函数; $H_{fi}(s)$ 和 $H_{fv}(s)$ 分别为电流、电压采样滤波传递函数; $G_d(s)$ 为控制延时的传递函数。

1.2 SVG 的阻抗模型

SVG 的级联 H 桥拓扑结构与控制框图如图 3 所示。其中: $v_{a,b,c}$ 、 $i_{a,b,c}$ 和 $v_{ia,b,c}$ 分别为并网点三相电压、三相电流、SVG 输出端口三相电压; V_{dcn} ($n=1,2, \dots, N$)为模块电容电压; V_{dcr} 为模块电容电压参考值; $v_{dca,b,c}$ 为 SVG 三相 H 桥模块电容电压。

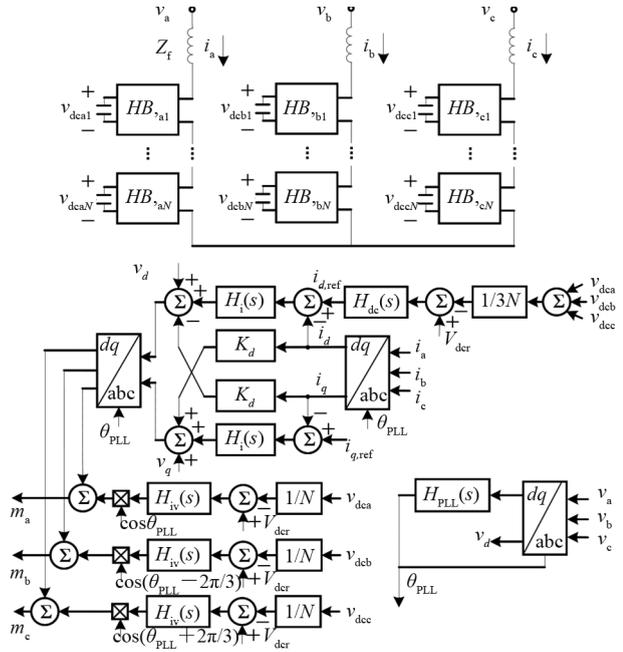


图 3 SVG 拓扑结构与控制

与上面类似,基于谐波线性化方法可以得到 SVG 的阻抗模型,具体建模过程可参考文献[10]。与光伏逆变器同理,研究 SVG 高频段阻抗特性时可以忽略频率耦合特性,并忽略锁相环、功率外环、全局电压控制和相间电压控制的影响。因此,SVG 的高频段阻抗模型可以简化为

$$Z_{svg}(s) = \frac{Z_f(s) + NV_{dcr} H_{fi}(s) H_i(s) G_d(s)}{1 - NV_{dcr} H_{fv}(s) G_d(s)} \quad (2)$$

式中, N 为 SVG 三相 H 桥的模块数。

1.3 高频通用阻抗模型与小信号控制

根据上面的阻抗表达式(1)和式(2)可以发现,光伏机组和 SVG 的高频阻抗模型在结构上具有相似性,两者主要区别在光伏逆变器的直流侧电压为直流电容电压,而 SVG 的等效直流电压为模块电容电压和。因此,可以定义一个通用阻抗模型表征 SVG 和光伏机组的高频阻抗特性,表达式为

$$Z_p(s) = \frac{Z_f(s) + KV_{dc0} H_{fi}(s) H_i(s) G_d(s)}{1 - KV_{dc0} H_{fv}(s) G_d(s)} \quad (3)$$

式中: K 为直流电压调制系数; V_{dc0} 为光伏逆变器或 SVG 的等效直流电压参考值。

根据式(3),光伏机组和 SVG 的高频简化小信号控制框如图 4 所示。

1.4 含附加控制策略的高频通用阻抗模型

根据图 4 所示的小信号控制框图,高频附加控制策略根据是否改变原有控制结构可以分为两类:

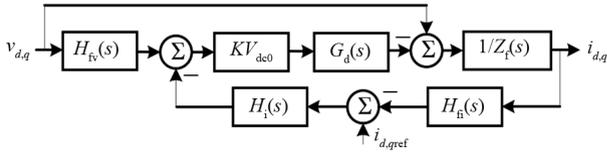


图 4 光伏机组和 SVG 的高频简化小信号控制

1) 优化控制器而不改变原有控制结构,例如对前馈电压进行低通滤波或陷波;2) 在原有控制结构基础上增加控制环节,例如通过电流反馈量构造虚拟阻抗。下面将对两类附加控制策略下的高频阻抗进行建模。

针对第一类附加控制策略,对前馈电压或电流进行滤波是通过设计适当的电压采样滤波传递函数 $H_v(s)$ 或电流采样滤波传递函数 $H_f(s)$ 以实现高频阻抗重塑。因此,此类附加控制策略下,高频阻抗模型仍为表达式(3)。

针对第二类附加控制策略,可以根据附加控制环节 $F_{ad}(s)$ 的控制对象与作用位置分为如图 5 所示的 4 种情况^[12]。其中,图 5(a)以 dq 轴电压 $v_{d,q}$ 作为输入量,经过附加控制器 $F_{ad}(s)$ 作用后叠加至电流环输出,相当于在电压前馈环节引入一个并联控制器 $F_{ad}(s)$;图 5(b)以 dq 轴电压 $v_{d,q}$ 作为输入量,经过附加控制器 $F_{ad}(s)$ 作用后叠加至电流环输入,

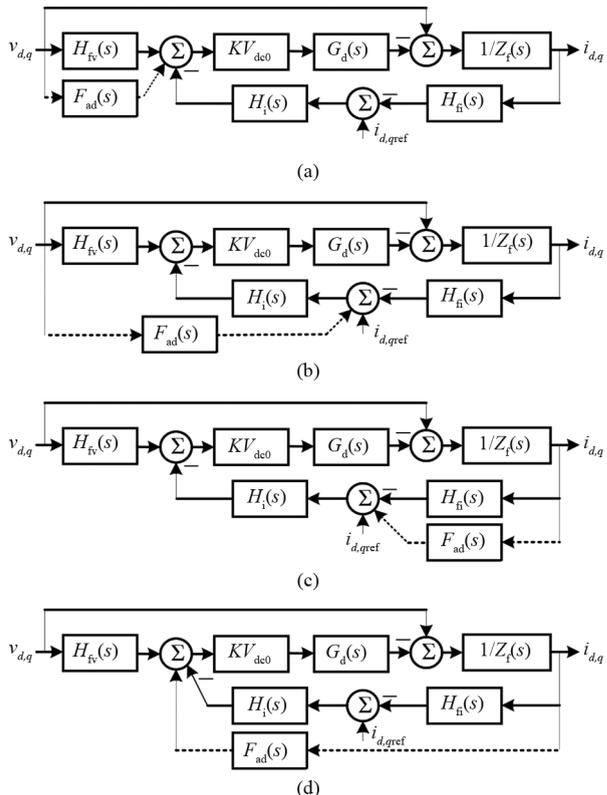


图 5 含高频附加控制环节的小信号控制

相当于引入一个虚拟导纳控制器^[13];图 5(c)以 dq 轴电流 $i_{d,q}$ 作为输入量,经过附加控制器 $F_{ad}(s)$ 作用后叠加至电流环输入,相当于在电流滤波环节引入一个并联控制器 $F_{ad}(s)$;图 5(d)以 dq 轴电流 $i_{d,q}$ 作为输入量,经过附加控制器 $F_{ad}(s)$ 作用后叠加至电流环输出,相当于引入一个有源阻尼控制器^[13]。

根据图 5,在 4 种附加控制环节下,高频阻抗模型表达式(3)分别可以拓展为

$$\begin{cases} Z_p(s) = \frac{Z_f(s) + KV_{dc0}H_f(s)H_i(s)G_d(s)}{1 - KV_{dc0}[H_v(s) + F_{ad}(s)]G_d(s)} \\ Z_p(s) = \frac{Z_f(s) + KV_{dc0}H_f(s)H_i(s)G_d(s)}{1 - KV_{dc0}[H_v(s) - F_{ad}(s)H_i(s)]G_d(s)} \\ Z_p(s) = \frac{Z_f(s) + KV_{dc0}[H_f(s) - F_{ad}(s)]H_i(s)G_d(s)}{1 - KV_{dc0}H_v(s)G_d(s)} \\ Z_p(s) = \frac{Z_f(s) + KV_{dc0}[H_f(s)H_i(s) + F_{ad}(s)]G_d(s)}{1 - KV_{dc0}H_v(s)G_d(s)} \end{cases} \quad (4)$$

2 光伏场站的高频振荡风险分析

根据阻抗稳定性分析理论^[6],当光伏场站与所接入设备或所接入电网发生阻抗交互,且在对应频段内存在负阻尼时,光伏场站将面临高频振荡风险。因此,下面将基于高频阻抗模型表达式,分析光伏场站在高频段的负阻尼产生原因,在此基础上进一步分析附加控制策略对高频阻抗特性的影响,最终得到含 SVG 的光伏场站面临的典型高频振荡风险。

2.1 SVG 与光伏机组的高频阻抗特性分析

光伏机组和 SVG 的高频阻抗特性可以通过高频阻抗式(3)进行分析。首先,忽略电压滤波与电流滤波的影响,则传递函数 $H_v(s)$ 与 $H_f(s)$ 均简化为常数 1。同时,不妨假设系数 K 和电压参考值 V_{dc0} 均为常数 1,滤波器支路由电感 L_f 构成,电流环采用 PI 控制器,延时环节的时间常数记为 T_d 。于是,高频阻抗模型表达式(3)可以简化为

$$Z_p(s) \approx \frac{sL_f + (k_{ip} + k_{ii}/s) \cdot e^{-sT_d}}{1 - e^{-sT_d}} \approx \frac{sL_f + k_{ip} \cdot e^{-sT_d}}{1 - e^{-sT_d}} \quad (5)$$

式中: k_{ip} 、 k_{ii} 分别为电流环比例系数和积分系数; e^{-sT_d} 为延时环节,可以进一步表示为频率 f 的函数。

$$e^{-sT_d} = \cos(2\pi T_d f) - j\sin(2\pi T_d f), s = j2\pi f \quad (6)$$

所以,高频阻抗模型与频率 f 的关系为

$$Z_p = \frac{k_{ip} \cos(2\pi T_d f) + j[2\pi L_f f - k_{ip} \sin(2\pi T_d f)]}{1 - \cos(2\pi T_d f) + j\sin(2\pi T_d f)} \quad (7)$$

可以发现,对式(7)的分子而言,虚部在高频段由滤波电感主导,且实部 $k_{ip} \cos(2\pi T_d f)$ 将随频率 f 的变化而出现周期性负阻尼。同时,对式(7)的分母而言,其幅值和相位均随频率 f 的变化而出现周期性变化。

因此,式(7)的相位将会出现周期性变化,当相位在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时高频阻抗表现为阻感性,相位在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 表现为负阻感性。当阻抗表现为负阻感性时,可能会和频段呈容性的设备或所接入的容性电网发生交互,从而造成高频振荡风险。

2.2 附加控制策略对高频阻抗的影响分析

2.2.1 第一类附加控制策略的影响

首先分析第一类附加控制策略的影响,即分析电压采样滤波传递函数 $H_v(s)$ 和电流采样滤波传递函数 $H_i(s)$ 将如何影响高频阻抗模型。

根据式(7),电流滤波 $H_i(s)$ 作用于高频阻抗表达式分子,相当于对式(7)分子中的电流控制系数 k_{ip} 乘以一个滤波函数,又由于式(7)的分子在高频段由滤波电感主导,因此基于电流滤波的第一类附加控制策略对高频段阻抗塑造能力有限。

同理,电压滤波 $H_v(s)$ 作用于高频阻抗模型表达式分母,相当于对式(7)分母中的正余弦计算结果进行滤波。当对电压进行低通滤波时,可以认为在滤波器截止频率以上的频段,正余弦计算所引入的周期性相位跳变已被滤除。因此,电压低通滤波可以改善设备在高频段的负阻特性。但是,截止频率选择过低会削弱设备的动态响应特性,而截止频率选择过高将无法起到有效的阻抗重塑作用。

当对电压进行带通滤波时,带通滤波器的相位补偿作用会使中心频率左侧的相位降低,右侧的相位增高。因此,电压带通滤波虽然可以改善部分频段的阻抗相位特性,但是也可能加剧其他频段的负阻特性,从而诱发其他频段的振荡风险。

2.2.2 第二类附加控制策略的影响

对第二类附加控制策略中的图5(a)而言,附加

控制环节 $F_{ad}(s)$ 相当于电压滤波传递函数 $H_v(s)$ 的一个并联环节。因此,附加控制环节 $F_{ad}(s)$ 的阻抗塑造作用与改变电压滤波函数 $H_v(s)$ 一致。

同理,对图5(b)而言,附加控制环节 $F_{ad}(s)$ 乘以电流控制函数 $H_i(s)$ 后与电压滤波传递函数 $H_v(s)$ 并联。因此,其阻抗塑造作用也相当于改变电压滤波函数 $H_v(s)$ 。

对图5(c)、(d)而言,附加控制环节 $F_{ad}(s)$ 均相当于在滤波支路阻抗 $Z_f(s)$ 上串联一个虚拟阻抗,其作用效果类似于改变电流滤波传递函数 $H_i(s)$ 。又由于滤波电感在高频段占绝对主导作用,因此采用电流量作为控制对象的附加控制环节(c)、(d)对高频段阻抗塑造能力有限。

2.3 光伏场站面临的典型高频振荡风险

根据阻抗模型表达式(3)对图1所示的光伏场站进行分析。在表1所示的典型参数下,光伏机组与SVG的高频段阻抗特性曲线分别如图6、图7所示。需要说明的是,光伏逆变器开关频率通常在5 kHz以内,且阻抗模型仅适用于1/2开关频率以下的频段,因此图6仅绘制2 kHz以下的光伏机组高频段阻抗特性曲线。而SVG等效开关频率可达数十千赫兹,阻抗模型的适用频段较高。

表1 光伏场站主要典型参数

设备	参数	值	设备	参数	值
SVG	S/Mvar	30	光伏机组	F/MW	1
	V_1 /kV	35.0		V_1 /kV	0.4
	L_f /mH	7.96		L_f /mH	1.00
	N	36		V_{dc} /kV	0.85

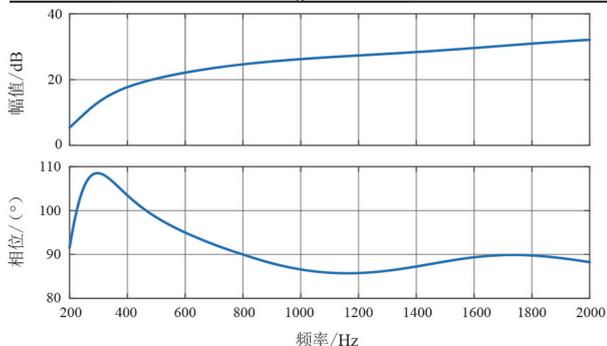


图6 光伏机组的典型高频阻抗曲线

对比图6、图7可以发现,光伏机组在高频段的负阻特性主要集中在1 kHz以内的高频段,而SVG在1.5 kHz以上仍存在较明显的负阻特性。

当场站内的光伏机组运行时,光伏机组经过

0.4 kV/35 kV 箱式变压器升压后通过汇集电缆连接至 35 kV 母线,同时 SVG 直挂于 35 kV 母线。由于光伏机组在 1 kHz 以上高频段通常具有正阻尼,且箱式变压器对高频段具有滤波阻尼作用,两者可以共同抵消 SVG 在 1 kHz 以上高频段引入的负阻尼。因此,光伏机组运行时,光伏场站 35 kV 侧系统在高频段的负阻尼主要集中在 1 kHz 以内的高频段。

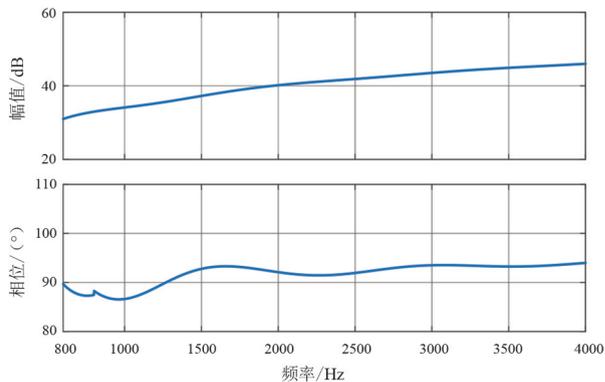


图 7 SVG 的典型高频阻抗曲线

当光伏机组在夜间停运时,光伏场站 35 kV 侧系统的稳定特性将由汇集电缆和 SVG 主导。因此光伏机组夜间停运时,光伏场站 35 kV 侧系统可能在 1.5~4 kHz 的超高频段仍存在负阻尼。

进一步地,根据阻抗稳定性分析理论^[6],含 SVG 的光伏场站主要面临以下两类高频振荡风险:

1) 当光伏机组运行时,光伏场站 35 kV 侧系统在 1 kHz 以内的高频段可能存在负阻感特性;当系统接入容性电网,或所接入大电网中具有高频段呈容性的补偿设备时,可能面临 1 kHz 以内的高频振荡风险。

2) 当光伏机组夜间停运时,光伏场站 35 kV 侧系统中的 SVG 在 1.5~4 kHz 的超高频段仍可能表现为负阻感特性,而场站内汇集电缆在高频段表现为容性,若 SVG 与电缆发生交互,可能会诱发 1.5~4 kHz 超高频段的高频振荡风险。

3 仿真算例分析

3.1 高频振荡算例

以图 1 的四川某光伏场站为例,通过 Simulink 电磁暂态仿真对上述研究进行验证。仿真中,SVG 模型采用某型号封装模型,汇集电缆采用 π 型等值模型并使用实测参数。

某种运行方式下,光伏场站中的某 35 kV 母线

下有光伏机组全部停运,SVG 运行,两条汇集电缆 A 和电缆 B 空载运行,0.35 s 切除空载电缆 B,该过程中 SVG 的电压、电流波形如图 8 所示。

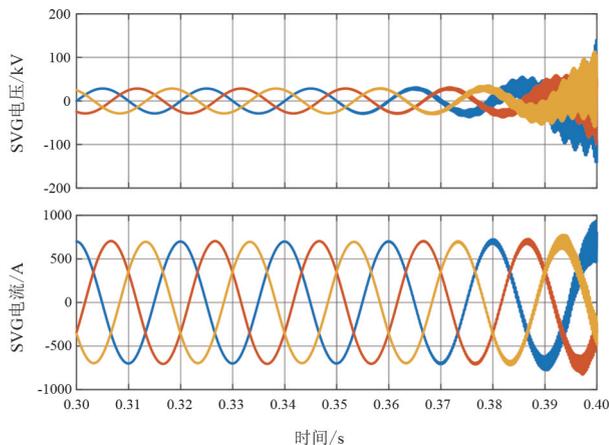


图 8 某光伏场站内 SVG 的电压电流仿真波形

对图 8 中 0.35~0.37 s 的 A 相电压振荡波形进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 分析,结果如图 9 所示。根据图 8、图 9 可以发现,该运行方式下,切除空载电缆 B 后,剩余空载电缆 A 与 SVG 发生交互,触发了高频振荡,振荡分量包括 3450 Hz 和 3950 Hz 分量。

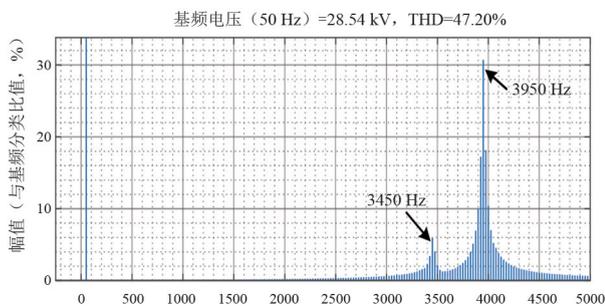


图 9 高频振荡期间 SVG 的 A 相电压 FFT 分析结果

因此,上述仿真算例表明,当光伏场站中光伏机组在夜间停运时,光伏场站内的 SVG 可能与汇集电缆发生交互,引发高频振荡问题,且振荡频率可达 3 kHz 以上。该算例验证了第 2.3 节所提出的光伏场站的第二类典型高频振荡风险。

同时需要强调的是,SVG 在 1.5~4 kHz 的宽频段范围内都可能存在负阻特性,而如图 1 所示的大型光伏场站中汇集电缆条数众多、阻抗特性各异。因此,不同空载电缆组合后可能与 SVG 在多个频率点发生交互,造成振荡频率在 1.5~4 kHz 宽范围内漂移,对振荡抑制策略的运行场景的适应性提出了严峻挑战。

3.2 高频振荡抑制算例 1

针对上述高频振荡算例,可以通过对 SVG 加强滤波、降低电流控制强度的方式抑制高频振荡。保持算例设置与第 3.1 节一致,首先令优化后的 SVG 运行至稳态,在 0.41 s、0.61 s、0.81 s、1.01 s 先后投入空载电缆 A、B、C、D,仿真波形如图 10 所示。

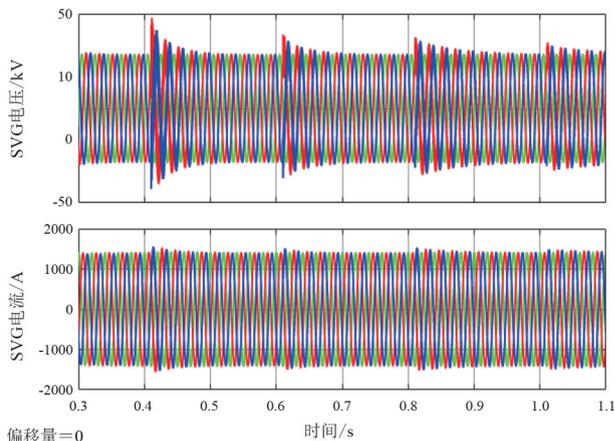


图 10 SVG 控制策略优化后的 SVG 电压、电流仿真波形

因此,上述仿真结果表明,对 SVG 加强滤波并减小电流控制参数可以抑制高频振荡问题。但是需要说明的是,这种优化方式降低了 SVG 的控制带宽,会削弱 SVG 的动态无功支撑能力,在实际应用中需要平衡响应速度需求与系统稳定要求之间的矛盾。同时,由于光伏场站面临振荡风险在宽频段范围漂移的复杂场景,因此还需要进一步验证该优化方式的运行场景适应性。

3.3 高频振荡抑制算例 2

根据上面分析,含 SVG 的光伏场站可能面临振荡频率宽范围漂移的高频振荡风险,当场站运行方式变化时,所设计的高频振荡附加控制策略可能会失效。因此,也有部分学者提出了可以加装无源滤波装置抑制高频振荡。

参照文献[12],在上述高频振荡算例中的 35 kV 母线上并接入一个 RLC 二阶高通滤波装置,验证其振荡抑制效果。保持算例设置与第 3.1 节一致,0.35 s 时切除空载电缆 B,高频振荡产生,0.4 s 时投入该滤波装置,该过程中 SVG 的电压、电流波形如图 11 所示。

因此,上述仿真结果表明,通过在 35 kV 母线上并接入无源高通滤波装置的方式可以有效抑制上述光伏场站高频振荡。但是,增设额外装置存在成

本高、占地面积大等问题,同时也需要分析无源装置接入对系统暂态、稳态运行特性的影响,在实际应用中需要综合考虑以上因素。

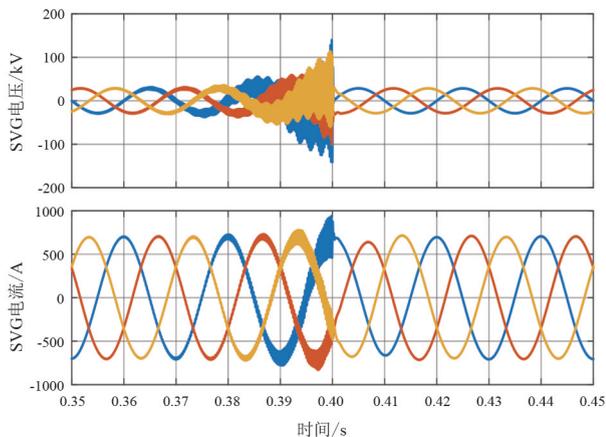


图 11 无源滤波装置投入后的 SVG 电压、电流仿真波形

4 结 论

上面围绕光伏场站高频振荡问题,建立了光伏机组和 SVG 的高频通用阻抗模型,深入分析了高频阻抗特性及附加控制的影响,提出了含 SVG 的光伏场站面临的典型高频振荡风险。最后,针对四川某光伏场站开展电磁暂态仿真,对所研究内容进行了验证。主要结论如下:

1) 光伏机组与 SVG 在高频段存在由控制延时引入的负阻尼,且 SVG 的宽控制带宽和多类型附加控制可能使其在 1.5 kHz 以上频段仍存在负阻特性,超出了常规的 2.5~1000 Hz 阻抗评估范围。

2) 当光伏机组运行时,光伏场站主要面临接入容性电网或容性补偿设备而造成的高频振荡风险;当光伏机组夜间停运时,光伏场站还将面临由 SVG 与站内汇集电缆造成的高频振荡风险。

3) 通过优化 SVG 等设备的控制器或增加附加阻尼控制可以改善设备高频段阻抗特性,从而避免高频振荡风险,但需要平衡设备响应速度需求与系统稳定要求之间的矛盾,并且需要适应不同运行方式下振荡风险在宽频段范围漂移的复杂场景。

4) 增加无源滤波装置可以抑制光伏场站的高频振荡,但需要考虑设备投资、占地面积,以及对系统暂态、稳态运行特性影响等综合因素。

参考文献

- [1] 辛保安.新型电力系统构建方法论研究[J].新型电力系统,2023,1(1):1-18.
- [2] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
- [3] 宾子君,袁宇波,许璠,等.基于故障录波的海上风电经柔直并网系统阻抗分析方法[J].电网技术,2022,46(8):2920-2928.
- [4] BUCHHAGEN C, RAUSCHER C, MENZE A, et al. BorWin1 -First experiences with harmonic interactions in converter dominated grids [C]//International ETG Congress 2015 Die Energiewende-Blueprints for the new energy age, Nov.17-18, 2015, Bonn, Germany. IEEE, 2015.
- [5] 张东辉,陈新,杨舒婷,等.含静止无功补偿装置的光伏电站高频谐振分析及抑制策略研究[J].中国电机工程学报,2023,43(24):9580-9594.
- [6] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [7] 年珩,徐韵扬,陈亮,等.并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1421-1432.
- [8] 李光辉,王伟胜,刘纯,等.直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一):宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6547-6562.
- [9] XU Yunyang, NIAN Heng, WANG Tao, et al. Frequency coupling characteristic modeling and stability analysis of doubly fed induction generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1475-1486.
- [10] 张旸,孙龙庭,陈新,等.集成静止无功发生装置的直驱风场序阻抗网络模型与稳定性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2877-2891.
- [11] 能源行业风电标准化技术委员会风电场并网管理分技术委员会.风电场阻抗特性评估技术规范:NB/T 10651—2021[S].北京:中国标准出版社;2021.
- [12] 郭贤珊,刘泽洪,李云丰,等.柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(1):19-29+370.
- [13] 李光辉,王伟胜,刘纯,等.直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(二):基于阻抗重塑的宽频带振荡抑制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6908-6920.
- [14] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- 作者简介:
徐韵扬(1994),女,博士,研究方向为电力系统安全稳定分析、新能源并网系统等。(收稿日期:2024-03-21)
- converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- 作者简介:
史华勃(1987),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制;
曾雪洋(1992),男,博士,高级工程师,研究方向为新能源并网控制、变速抽水蓄能协调控制与高压直流输电;
马俊鹏(1990),男,博士,副教授,研究方向为电力电子设备在电网中的应用;
王永灿(1992),男,博士,高级工程师,长期从事大电网安全稳定分析、多能互补发电等方面的研究;
潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为变速抽水蓄能优化控制及振荡、新能源发电系统宽频带阻抗测量;
姜振超(1981),男,硕士,正高级工程师,长期从事智能变电站及特高压换流站调试及运维技术研究。(收稿日期:2024-03-21)

(上接第 22 页)

- [14] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG C, et al. On the equivalence and impact on stability of impedance modelling of power electronic converters in different domains [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1444-1454.
- [15] AZZOUZ M A, EI-SAADANY E F. Multivariable grid admittance identification for impedance stabilization of active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1116-1128.
- [16] VALDIVIA V, LAZARO A, BARRADO A, et al. Black-box modeling of three-phase voltage source inverters for system-level analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3648-3662.
- [17] WANG X F, HARNEFOSR L, BLAABIERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source