

基于广义短路比的光伏多馈入系统容量优化方法

黄锐¹, 兰洲², 辛焕海¹, 董炜¹, 袁辉¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省杭州市 310006)

摘要: 广义短路比可用于描述电力电子多馈入系统小干扰稳定性, 基于此指标研究了光伏发电(或场)多点馈入电网的总容量一定时, 各点接入容量优化分配的问题, 使光伏多馈入系统的小干扰稳定裕度最大。首先, 建立了光伏多馈入系统的小干扰稳定分析模型; 其次, 利用广义短路比关于各馈入点光伏接入容量的灵敏度, 提出了光伏多馈入系统的并网点容量优化方法; 最后, 以光伏三馈入系统为例, 验证所提容量优化方法的可行性和有效性。仿真结果表明, 合理分配多点接入时光伏的并网容量, 能够有效提高系统的广义短路比和小干扰稳定裕度。

关键词: 广义短路比; 光伏多馈入系统; 容量优化; 灵敏度分析; 等微增率准则

0 引言

随着全球能源危机的不断加剧和环境污染的日益严重, 以光伏为代表的可再生清洁能源发电越来越受到重视^[1-4]。中国能源资源分布不均, 面对电能大规模远距离输送的需求, 高比例多光伏集群并网已经成为光伏发电产业未来发展的重要趋势^[1-2, 5]。研究表明, 日益增大的光伏并网容量接入后, 交流系统相对变弱, 容易出现小干扰稳定性问题^[5-6]。

解决光伏导致的小干扰稳定问题, 可以从光伏设备或者从电网结构两方面入手。从设备层面看, 调整光伏控制器参数, 如锁相环及电流内环控制参数^[7-8], 以增加系统的稳定裕度; 另一方面, 通过优化光伏并网容量以及接入位置, 也可以提高系统的稳定裕度。本文关注光伏发电(或场)总容量一定时, 如何优化分配光伏各接入点的容量以提高系统的小干扰稳定裕度。

目前, 国内外关于光伏发电容量优化的研究基本上集中在配电网侧分布式光伏发电^[9-14]。文献[12]将微网中光伏电源并网容量的确定转化为考虑网损降低和电压约束的双目标非线性优化规划问题。文献[13]研究了风光蓄互补发电系统的容量优化问题, 通过选取最优的风电、光伏、蓄电池容量组

合, 在保证负荷供电可靠性的前提下使得系统成本最小。文献[14]针对光伏出力的随机性和负荷的波动性, 以改进的电压稳定裕度指标为目标函数, 建立光伏发电的选址定容优化模型。

以上光伏容量优化研究或从电网经济运行的角度或从电压稳定的角度展开。而在实际工程中, 对于电力电子多馈入系统, 小干扰稳定问题相较于静态电压问题更容易发生^[15]。例如, 西北电网中光伏并网规划容量很大, 系统潜在的小干扰稳定问题突出^[16-17], 但如何有序规划光伏并网的落点和容量以解决潜在的振荡问题研究较少。

广义短路比(generalized short circuit ratio, gSCR)是一种能够表征电力电子多馈入系统强度以及反映系统运行风险的指标, 可一定程度上量化系统的小干扰稳定裕度^[15]。其灵敏度大小与电力电子多馈入系统的薄弱点密切相关, 能够为可再生能源机组/基地选址定容、电网规划等问题提供一定的理论支撑。以此为基础, 本文针对光伏发电(或场)多点馈入电网的总容量一定时各馈入点的接入容量如何优化分配的问题, 利用gSCR的等微增率思路提出使该光伏多馈入系统的小干扰稳定裕度最大的优化算法。首先, 推导得到光伏设备侧雅可比传递矩阵, 给出光伏多馈入系统的gSCR指标; 其次, 提出了基于gSCR灵敏度的容量优化方法; 最后, 通过算例验证了容量优化方法的可行性及有效性。

1 光伏多馈入系统gSCR

在实际工程中, 随着光伏设备接入容量的增加,

收稿日期: 2018-01-20; 修回日期: 2018-06-25。

上网日期: 2018-11-28。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902000); 国家自然科学基金资助项目(U1766206); 国家电网公司科技项目(52110418000P)。

受端交流系统强度变弱,导致系统运行风险提高,该稳定问题在多台光伏馈入电网时尤为突出。本文考虑如图1所示的含 n 台光伏设备馈入的交流系统,其中第 i 台光伏设备端口电压的幅值和相角分别为 U_i 和 θ_i ,其注入交流网络侧的有功和无功功率分别为 P_i 和 Q_i ,所接入交流电网母线的等值电势为 $E_i \angle \theta_0$, Z 为交流系统等值阻抗。

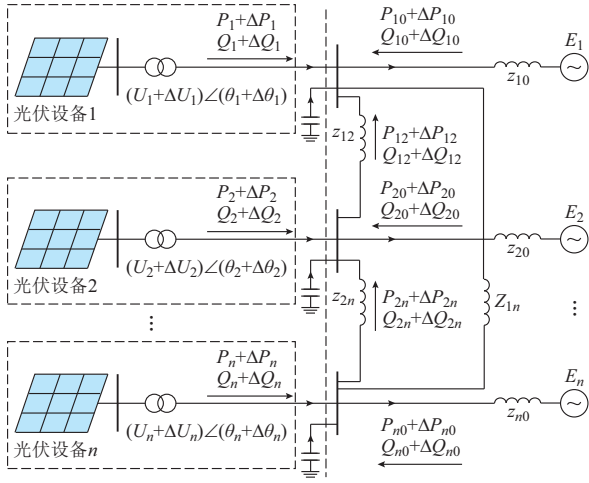


图1 光伏多馈入系统

Fig. 1 Multi-feed photovoltaic system

1.1 光伏设备雅可比传递矩阵

单馈入光伏系统的变流器采用基于锁相环(PLL)的双环矢量控制策略,外环采用直流电压控制,此时系统动态方程如式(1)至式(4)所示^[18-20],控制框图见附录A图A1。

$$\begin{cases} \theta_{pll} = G_{pll}(s)U_q \\ \omega = s\theta_{pll} + \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{dc} C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{in} - P_e G_{PF}(s) \\ I_{c,d}^{ref} = (U_{dc} - U_{dc}^{ref})G_{dc}(s) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_{s,d}^{ref} = (I_{c,d}^{ref} - I_{c,d})G_i(s) + U_d - \omega_0 L_f I_{c,q} \\ U_{s,q}^{ref} = (I_{c,q}^{ref} - I_{c,q})G_i(s) + U_q + \omega_0 L_f I_{c,d} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{s,d} = U_d + sL_f I_{c,d} - \omega L_f I_{c,q} \\ U_{s,q} = U_q + sL_f I_{c,q} + \omega L_f I_{c,d} \end{cases} \quad (4)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; θ_{pll} 为锁相环测量角度; ω_0 和 ω 分别为角频率额定值和实际值; $G_{pll}(s)$ 为锁相环的传递函数; U_d 和 U_q 分别为并网点电压的 d 轴分量和 q 轴分量; C_{dc} 为直流侧电容; U_{dc} 和 U_{dc}^{ref} 分别为直流电容电压及其参考值; $G_{dc}(s)$ 为直流电压外环的传递函数; P_{in} 和 P_e 分别为光伏阵列发出有功功率和变流器网侧有功功率; $G_{PF}(s)$ 为有功滤波环节的传递函数; L_f 为滤波电感; $I_{c,d}$ 和 $I_{c,q}$ 分别为

流过滤波电感电流的 d 轴分量和 q 轴分量, $I_{c,d}^{ref}$ 和 $I_{c,q}^{ref}$ 分别为 $I_{c,d}$ 和 $I_{c,q}$ 的参考值; $G_i(s)$ 为电流内环的传递函数; $U_{s,d}$ 和 $U_{s,q}$ 分别为变流器网侧电压的 d 轴分量和 q 轴分量, $U_{s,d}^{ref}$ 和 $U_{s,q}^{ref}$ 分别为 $U_{s,d}$ 和 $U_{s,q}$ 的参考值。

为推导光伏设备的雅可比传递矩阵,考虑到因光照强度和环境温度变化很慢,研究频率较高的振荡问题时可以近似忽略其动态^[19-20],故本文假设光伏阵列发出有功功率 P_{in} 恒定。

由于本文考虑容量规划问题,不失一般性,以工作在额定工况的光伏为研究对象。此时,单个光伏设备的雅可比传递函数矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & G_{PU}(s) \\ G_{QU}(s) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: U 为变流器并网点电压; $G_{PU}(s)$ 和 $G_{QU}(s)$ 的表达式参考文献[18]。

1.2 光伏多馈入系统 gSCR

文献[15]提出了电力电子多馈入系统 gSCR 指标,从小干扰稳定角度评估光伏多馈入系统的相对强度,并基于以下3个假设条件。

假设1:多馈入系统的 n 台电力电子设备同构,即控制策略,以设备自身容量为基准的主电路参数(标么值)都相同,但设备容量可以不同。

假设2:等效交流网络是连通的且网络中电阻和电容均远小于电感而近似忽略。

假设3:稳态时电力电子设备间联络线上功率远小于传输极限,即母线稳态相角有 $|\sin(\theta_i - \theta_j)| \ll 1$ 。

结合光伏设备雅可比传递矩阵以及网络侧的雅可比传递矩阵^[15],可以求出光伏多馈入系统的闭环特征方程式如下:

$$0 = \det \left(\begin{bmatrix} \mathbf{0} & G_{PU}(s)\mathbf{S}_B \\ G_{QU}(s)\mathbf{S}_B & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{P}_g \\ -\mathbf{P}_g & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha(s)U^2\mathbf{B} & \beta(s)U^2\mathbf{B} \\ -\beta(s)U^2\mathbf{B} & \alpha(s)U^2\mathbf{B} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{P}_g = \mathbf{P}\mathbf{S}_B = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_n)\mathbf{S}_B$ 为各馈入光伏设备在系统基准容量下的有功功率标么值, P_i ($i=1, 2, \dots, n$)表示光伏设备在自身额定容量下的有功功率标么值,这里认为 $P_i=1$; $\mathbf{U} = \text{diag}(U_1, U_2, \dots, U_n)$ 为多馈入交流系统各端口电压,近似为标量矩阵; $\mathbf{B}$ 为多馈入交流系统多端口导纳矩阵; $\mathbf{S}_B = \text{diag}(S_{B1}, S_{B2}, \dots, S_{Bn})$ 为馈入光伏设备额定容量; $\alpha(s) = \omega_0^2/(s^2 + \omega_0^2)$; $\beta(s) = \omega_0 s/(s^2 + \omega_0^2)$ 。

将式(6)中各项同时左乘矩阵 $\mathbf{I}_2 \otimes \mathbf{S}_B^{-1}$,此时光

伏多馈入系统的闭环特征方程简化为:

$$\det \left(\begin{bmatrix} \mathbf{0} & G_{PU}(s) \\ G_{Q0}(s) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_n + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{P} \\ -\mathbf{P} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha(s)\mathbf{J}_{eq} & \beta(s)\mathbf{J}_{eq} \\ -\beta(s)\mathbf{J}_{eq} & \alpha(s)\mathbf{J}_{eq} \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (7)$$

式中:符号 $\otimes$ 表示 Kronecker 积; $\mathbf{I}_n$ 为 n 阶单位矩阵; $\mathbf{J}_{eq}$ 为定义的扩展导纳矩阵,其表达式如式(8)所示。

$$\mathbf{J}_{eq} = -\text{diag}(\mathbf{U}^2)\mathbf{S}_B^{-1}\mathbf{B} \approx -\mathbf{S}_B^{-1}\mathbf{B} \quad (8)$$

根据文献[15]可知,在一定条件下,含 n 台光伏设备的多馈入系统可以解耦为 n 个短路比为 $\lambda_i (i=1,2,\dots,n)$ 的完全独立的单馈入系统,其中 λ_i 为 $\mathbf{J}_{eq}$ 的特征根。这 n 个单馈入设备参数一致,但所接入的电网短路比不同,如附录 A 图 A2 所示。因此, n 个等效光伏单馈入系统中短路比最小的等效系统(最弱的等效单馈入系统)决定了整个多馈入系统的稳定性,要保证多馈入系统稳定,只需要保证最弱的等效单馈入系统稳定。故文献[15]将最弱的单馈入系统的短路比定义为多馈入系统的短路比,即广义短路比 gSCR,以反映多馈入系统的稳定性,表达式为:

$$\gamma_{gSCR} = \min \lambda(\mathbf{J}_{eq}) \quad (9)$$

式中: γ_{gSCR} 为 gSCR 的值。

通过上式可以发现, γ_{gSCR} 只与交流网络的导纳矩阵和接入的光伏容量相关,因此计算简单。基于 gSCR 指标的推导可知,光伏多馈入系统等效解耦为若干个光伏单馈入系统,且光伏多馈入系统 gSCR 与系统的小干扰稳定性直接联系起来,能够从小干扰稳定角度表征系统稳定裕度。此外,改变光伏的接入容量可以改变光伏多馈入系统的 gSCR,故 gSCR 的灵敏度与系统的薄弱点密切相关,可为光伏的选址定容问题提供基础,下节将作详细说明。

2 光伏多馈入系统容量优化方法

2.1 光伏多馈入系统容量优化问题描述

本文研究“光伏发电(或场)多点馈入电网的总容量一定时各馈入点的接入容量应该如何优化分配”的问题,使得该光伏多馈入系统的小干扰稳定裕度最大。即已知现有若干同类型的光伏设备,应该如何分散接入交流电网,使得系统的小干扰稳定性得到最大改善。本文的容量优化问题以多馈入光伏发电机组/基地的额定容量总和固定为其约束条件,即

$$\sum_{i=1}^n S_{Bi} = S_{B\Sigma} \quad (10)$$

式中: $S_{B\Sigma}$ 为给定的多馈入光伏发电机组/基地的额定容量总和; n 为馈入的光伏发电机组/基地数量; S_{Bi} 为第 i 个光伏机组/基地的额定容量。

如图 2 所示,以光伏三馈入系统为例,考虑到设备侧同构的假设,将各馈入系统参数分为额定容量 S_B ,以及要求在各馈入系统中标幺值必须相同的参数组,这里用集合 D 表示。

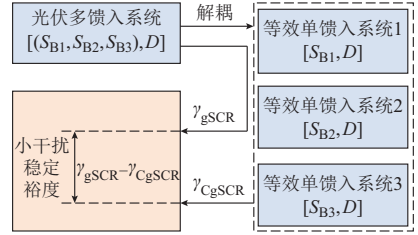


图 2 基于 gSCR 的小干扰稳定判据
Fig. 2 Small signal stability criterion based on gSCR

当光伏多馈入系统出现实部为 0 的特征根时,系统处于临界稳定的状态,此时的 gSCR 即为临界广义短路比(critical generalized short circuit ratio, CgSCR)。CgSCR 用于区分稳定系统与不稳定系统^[15,21]。

由式(7)可以求得表征原光伏多馈入系统的最弱光伏单馈入系统闭环特征方程与 gSCR 的显函数关系为:

$$\gamma_{gSCR}^2 + a(s)\gamma_{gSCR} + b(s) = 0 \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} a(s) = \frac{-\beta(s)(G_{PU}(s) - G_{Q0}(s))}{\alpha(s)} \\ b(s) = \frac{-G_{PU}(s)G_{Q0}(s)}{\alpha(s)} \end{cases}$$

通过分析式(11)不难发现,各个等效光伏单馈入系统的 CgSCR 均相同,即 CgSCR 不受各馈入光伏系统额定容量 S_{Bi} 的影响,整个光伏多馈入系统的临界广义短路比值 γ_{CgSCR} 唯一,如图 2 所示。

此外,由光伏多馈入系统解耦前后等价的性质,可知多馈入系统的小干扰稳定裕度可以用 γ_{gSCR} 与 γ_{CgSCR} 的差值来衡量。

2.2 光伏馈入点的灵敏度

下面给出 gSCR 关于各光伏发电机组/基地额定容量的灵敏度。

记 ψ 为扩展导纳矩阵 $\mathbf{J}_{eq}$ 对应特征根 γ_{gSCR} 的左特征向量,故有^[22]

$$\psi \mathbf{J}_{eq} = \gamma_{gSCR} \psi \quad (12)$$

将 $\mathbf{J}_{\text{eq}} = -\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\mathbf{B}$ 代入式(12),两边转置并考虑到多端口导纳矩阵 $\mathbf{B}$ 是对称阵,有

$$-\mathbf{B}\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\boldsymbol{\psi}^{\text{T}} = \gamma_{\text{gSCR}}\boldsymbol{\psi}^{\text{T}} \quad (13)$$

两边再同时左乘 $\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}$,则等价变形为:

$$-\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\boldsymbol{\psi}^{\text{T}}) = \mathbf{J}_{\text{eq}}(\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\boldsymbol{\psi}^{\text{T}}) = \gamma_{\text{gSCR}}(\mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\boldsymbol{\psi}^{\text{T}}) \quad (14)$$

记 $\boldsymbol{\phi} = \mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}\boldsymbol{\psi}^{\text{T}}$,由式(14)可知 $\boldsymbol{\phi}$ 是 $\mathbf{J}_{\text{eq}}$ 对应特征根 γ_{gSCR} 的右特征向量。因此,结合左右特征向量,可得 γ_{gSCR} 对各光伏机组/基地额定容量的灵敏度为:

$$\frac{\partial \gamma_{\text{gSCR}}}{\partial S_{\text{Bi}}} = -\gamma_{\text{gSCR}}\phi_i^2 < 0 \quad (15)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$; ϕ_i 为扩展导纳矩阵 $\mathbf{J}_{\text{eq}}$ 对应特征根 γ_{gSCR} 的右特征向量的第 i 个元素。

由上式可知,当某一光伏机组/基地额定容量 S_{Bi} 减小时,光伏多馈入系统广义短路比值 γ_{gSCR} 将增大。但是,考虑到多馈入光伏发电机组/基地额定容量总和 $S_{\text{B}\Sigma}$ 固定这一约束条件,某一光伏机组/基地的额定容量减小,必然使得另一机组/基地的额定容量有所增大,从而可能导致系统广义短路比值 γ_{gSCR} 反而减小,即系统稳定裕度降低。因此,有必要对光伏多馈入系统进行容量优化,以此来提高光伏多馈入系统的 gSCR。

2.3 光伏多馈入系统容量优化方法

通过推导光伏多馈入系统 gSCR 关于光伏容量的灵敏度表达式(如式(15)所示),可以发现:①gSCR 关于各馈入点接入光伏容量 S_{Bi} 的灵敏度恒为负值,表明交流电网所能接纳的光伏容量存在极限;②gSCR 关于接入光伏容量的灵敏度绝对值越大,其所对应馈入点的接入光伏容量应该优先进行调整;③在多馈入光伏发电机组/基地额定容量总和 $S_{\text{B}\Sigma}$ 固定的约束条件下,当 gSCR 关于各光伏机组/基地额定容量 S_{Bi} 的灵敏度相等时(即 gSCR 等微增率时,详见附录 B), γ_{gSCR} 达到最大值^[23]。此时系统的小干扰稳定性得到最大改善。

现假设交流网络侧已知,即交流网络拓扑及线路阻抗给定,以及所有馈入的光伏机组/基地运行在额定点,设计如下步骤的容量优化策略,其流程图详见附录 A 图 A3。

步骤 1:给出多馈入系统额定容量的迭代初始值,输入等效交流网络拓扑、线路阻抗以及各馈入光伏机组/基地出力等原始数据。

步骤 2:根据式(9)求出光伏多馈入系统的 gSCR,确认最薄弱的等效光伏单馈入系统,再由式(16)计算得到多馈入系统 gSCR 关于各个光伏机组/基地额定容量的灵敏度。

$$\frac{\partial \gamma_{\text{gSCR}}}{\partial S_{\text{Bi}}} = \frac{\psi_i}{S_{\text{Bi}}^2} \sum_{m=1}^n B_{im} \phi_m \quad (16)$$

式中: ψ_i 为扩展导纳矩阵 $\mathbf{J}_{\text{eq}}$ 对应特征根 γ_{gSCR} 的左特征向量的第 i 个元素。

步骤 3:比较步骤 2 计算得到的各个灵敏度,找出所有灵敏度绝对值中的最大值和最小值,分别记录下它们所对应的馈入支路编号 i_{max} 和 i_{min} ,并计算这组灵敏度数据的极差,更新当前迭代次数。

步骤 4:如式(17),比较步骤 3 求得的灵敏度极差与灵敏度偏差阈值 ρ 的大小关系及检查是否达到最大迭代次数,如果极差小于偏差阈值或达到最大迭代次数,则直接执行步骤 6,反之则执行步骤 5。

$$\max \left(\frac{\partial \gamma_{\text{gSCR}}}{\partial S_{\text{Bi}}} - \frac{\partial \gamma_{\text{gSCR}}}{\partial S_{\text{Bj}}} \right) < \rho \quad \forall i \neq j \quad (17)$$

步骤 5:微调编号为 i_{max} 的馈入支路上光伏机组/基地的额定容量,使得该机组/基地额定容量下调一单位;微调编号为 i_{min} 的馈入支路上光伏机组/基地的额定容量,使得该机组/基地额定容量上调一单位,返回到步骤 2。

步骤 6:输出迭代后的光伏多馈入系统容量以及系统的 gSCR。

3 算例分析

现考虑如图 1 所示的光伏三馈入系统,各光伏设备的控制参数如附录 A 表 A1 所示,设备的额定容量及电网参数分别见附录 A 表 A2 和表 A3。

在 MATLAB/Simulink 上搭建光伏三馈入系统小信号模型,通过线性分析求得解耦前后的特征根如附录 A 表 A4 所示。结果表明,原始三馈入系统与 3 个等效单馈入系统计算得到的特征值相同,可见解耦后的单馈入系统能够完全体现原始系统的小干扰稳定特性。

此外,结合式(11),通过不断改变线路阻抗大小直至系统出现位于虚轴上的特征根。在给定的逆变器控制参数下,由 $\gamma_{\text{gSCR}} = \min \lambda(\mathbf{J}_{\text{eq}})$ 计算得到光伏多馈入系统的 γ_{CgSCR} 为 3.681。

为验证上文所提出的光伏多馈入系统容量优化方法的有效性,选取如附录 A 表 A1 和表 A3 所示参数的光伏三馈入系统,在光伏设备额定容量总和 $S_{\text{B}\Sigma} = 5.5$ (标么值)与 $S_{\text{B}\Sigma} = 8$ (标么值)两种情景下,通过电磁暂态平均模型^[24]进行仿真分析。

3.1 情景 1:额定容量总和 $S_{\text{B}\Sigma}$ 为 5.5(标么值)

给定光伏三馈入系统额定容量总和 $S_{\text{B}\Sigma}$ 为 5.5(标么值),光伏设备工作在额定运行点即 $P=1$ (标么值),三馈入系统额定容量标么值为 $\mathbf{S}_{\text{B}} = \text{diag}(3, 5, 1, 1)$ 。按照流程图编写程序进行优化计

算,其中灵敏度偏差阈值 ρ 设为 0.000 1,最大迭代次数设为 500,以及设备额定容量微调步长设为 0.01(标么值)。结果表明,光伏三馈入系统的 γ_{gSCR} 由容量优化前的 3.716 增加至 6.667,三馈入系统的光伏接入容量优化至 $\mathbf{S}_{\text{B}}=\text{diag}(1,3,1.5)$ 。

情景 1 下光伏三馈入系统容量优化过程中主导特征根轨迹如图 3 所示。由图可知,随着系统容量的优化,主导特征根 λ_1 和 λ_2 不断向左移动,由优化前 $\lambda_{1,2}=-0.010\pm\text{i}56.628$ 变为优化后 $\lambda_{1,2}=-0.519\pm\text{i}56.592$,系统小干扰稳定性得到改善。由此说明,系统容量优化能够有效改善系统的小干扰稳定性。

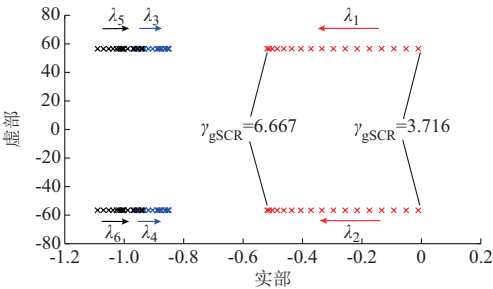


图 3 情景 1 下系统容量优化过程中主导特征根轨迹
Fig. 3 Loci of dominant eigenvalues with capacity optimization of system under scenario 1

下面进一步通过电磁暂态平均模型的时域仿真验证上述分析结果的正确性。 $t=0.1\text{ s}$ 时,无穷大电网的电压跌落 10%,0.1 s 后恢复。观察光伏三馈入系统容量优化前后最薄弱馈入系统(此时为图 1 所示的光伏设备 1)注入电网侧的有功功率 P 和无功功率 Q 振荡曲线,分别如图 4(a)和(b)所示,其中 P 和 Q 均为标么值。由图 4(a)和(b)可知,在相同的扰动下,最薄弱馈入系统的有功功率、无功功率相比于优化前衰减更快,波形达到稳定所需的时间更短,可见系统的小干扰稳定性得到提高。

3.2 情景 2:额定容量总和 $\mathbf{S}_{\text{B}\Sigma}$ 为 8(标么值)

给定光伏三馈入系统额定容量总和 $\mathbf{S}_{\text{B}\Sigma}$ 为 8(标么值),光伏设备工作在额定运行点即 $P=1$ (标么值),三馈入系统额定容量标么值为 $\mathbf{S}_{\text{B}}=\text{diag}(5,1.5,1.5)$ 。按照流程图编写程序进行优化计算,其中灵敏度偏差阈值 ρ 设为 0.000 1,最大迭代次数设为 500,设备额定容量微调步长设为 0.01(标么值)。结果表明,光伏三馈入系统的 γ_{gSCR} 由容量优化前的 2.595 增加至 4.583,三馈入系统的光伏接入容量优化至 $\mathbf{S}_{\text{B}}=\text{diag}(1.46,4.36,2.18)$ 。

情景 2 下光伏三馈入系统容量优化过程中主导特征根轨迹如图 5 所示。

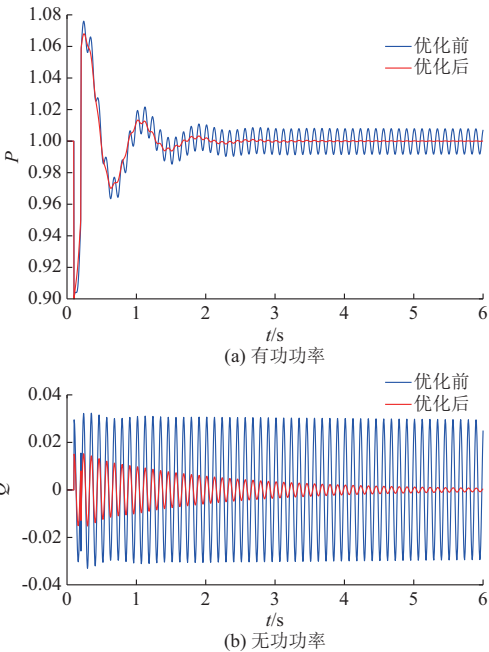


图 4 情景 1 下扰动时容量优化前后有功和无功功率对比
Fig. 4 Comparison of active and reactive power before and after capacity optimization during disturbance under scenario 1

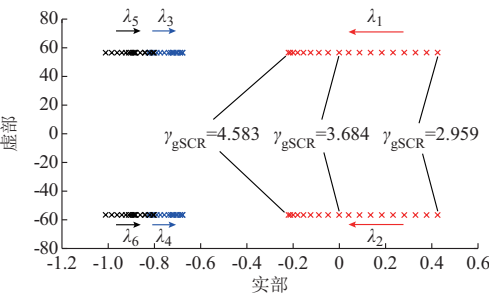


图 5 情景 2 下系统容量优化过程中主导特征根轨迹
Fig. 5 Loci of dominant eigenvalues with capacity optimization of system under scenario 2

由图 5 可知,随着系统容量的优化,主导特征根 λ_1 和 λ_2 不断向左移动。优化前系统存在位于右半平面的特征根(即主导特征根 λ_1 和 λ_2) $\lambda_{1,2}=0.425\pm\text{i}56.668$,此时系统是不稳定的。而经过优化后,系统特征根均分布在左半平面,此时主导特征根 $\lambda_{1,2}=-0.220\pm\text{i}56.612$,即光伏三馈入系统优化后从不稳定变为稳定。

值得一提的是,如图 5 所示,容量优化过程中三馈入系统的 γ_{gSCR} 不断增加,当其达到 3.684 时,主导特征根 λ_1 和 λ_2 为 $\lambda_{1,2}=-0.000\ 9\pm\text{i}56.629$,系统近似处于临界稳定状态。而该三馈入系统的 γ_{CgSCR} 为 3.681,与 3.684 几乎相等,由此说明单馈入系统计算得到的 CgSCR 可以作为用于衡量多馈

入系统小干扰稳定与否的指标,从而进一步地验证了光伏多馈入系统 gSCR 指标的有效性。

下面进一步通过电磁暂态平均模型的时域仿真验证上述分析结果的正确性。 $t=0.1\text{ s}$ 时,无穷大电网的电压跌落 10%, 0.1 s 后恢复。观察光伏三馈入系统容量优化前后最薄弱馈入系统(此时为图 1 所示的光伏设备 1)注入电网侧的有功功率 P 和无功功率 Q 振荡曲线,分别如图 6(a)和(b)所示,其中 P 和 Q 均为标么值。由图 6(a)和(b)可知,容量优化前后光伏三馈入系统由不稳定变为稳定,与图 5 中特征根轨迹结果一致,说明容量优化能够显著提高系统的小干扰稳定裕度。

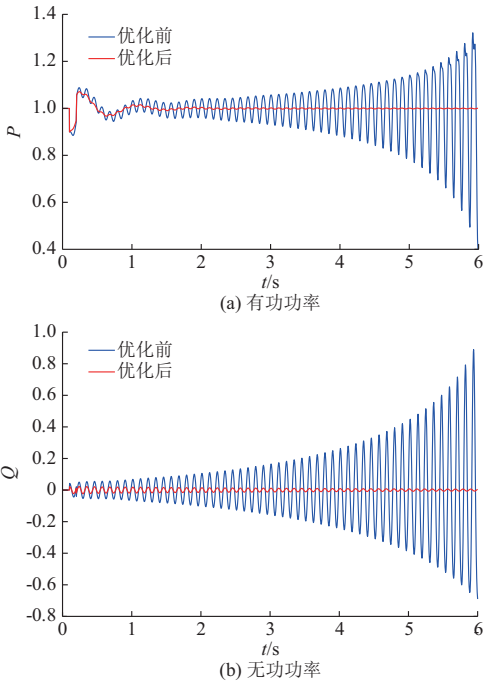


图 6 情景 2 下扰动时容量优化前后有功和无功功率对比

Fig. 6 Comparison of active and reactive power before and after capacity optimization during disturbance under scenario 2

在上述光伏三馈入系统设备额定容量总和分别为 $S_{B\Sigma}=5.5$ (标么值)与 $S_{B\Sigma}=8$ (标么值)两种情景下,应用前文所述的优化方法,提高了光伏三馈入系统的 gSCR,系统小干扰稳定裕度增强,验证了该方法对光伏多馈入系统并网容量优化问题的有效性。

值得一提的是,当应用于实际电网时,由于只需要利用多端口网络的戴维南等效电路,故本文所提出的基于 gSCR 等微增率准则的光伏接入容量分配优化方法应用于更大系统时同样可行。

4 结语

光伏多馈入系统的 gSCR 可用于刻画系统整体

的小干扰稳定特性,其对容量的灵敏度可用于优化光伏接入的容量。本文针对光伏发电(或场)多点馈入电网的总容量一定时各馈入点的接入容量如何优化分配的问题,利用 gSCR 等微增率的思路优化光伏接入容量以提升系统小干扰稳定裕度。所提出的方法为光伏多馈入系统容量规划以及稳定性评估提供了新的思路及指导参考,对其他新能源电站(如风电场)的大规模并网规划和运行也具有参考意义。此外,同时考虑系统小干扰稳定性和经济性等指标的多目标优化方法是下一步亟需开展的工作。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 薛峰,常康,汪宁渤. 大规模间歇式能源发电电网集群协调控制框架[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):45-53.
XUE Feng, CHANG Kang, WANG Ningbo. Coordinated control frame of large-scale intermittent power plant cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 45-53.

[2] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):2-11. DOI:10.7500/AEPS20170120004.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.

[3] 王冠中,陈炎,王蕾,等. 应用切比雪夫多项式滤波的高渗透率光伏分布式控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(21):133-139. DOI:10.7500/AEPS20170405007.
WANG Guanzhong, CHEN Ying, WANG Lei, et al. Distributed control strategy for photovoltaic units with high permeability using Chebyshev polynomials filtering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 133-139. DOI: 10.7500/AEPS20170405007.

[4] KROPOSKI B. Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 831-837.

[5] 葛景,都洪基,赵大伟,等. 光伏电站接入对多机电力系统低频振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):63-70. DOI:10.7500/AEPS20151223004.
GE Jing, DU Hongji, ZHAO Dawei, et al. Influences of grid-connected photovoltaic power plants on low frequency oscillation of multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 63-70. DOI: 10.7500/AEPS20151223004.

[6] 王冠中,董炜,辛焕海,等. 基于广义短路比的电力电子多馈入系统小干扰概率稳定评估[J]. 电力系统自动化,2018,42(18):17-24. DOI:10.7500/AEPS20170910004.
WANG Guanzhong, DONG Wei, XIN Huanhai, et al. Probabilistic stability evaluation of small disturbances for power

- electronic multi-infeed system based on generalized short-circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 17-24. DOI: 10.7500/AEPS20170910004.
- [7] LIU S, LIU P X, WANG X. Stochastic small-signal stability analysis of grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1027-1038.
- [8] MORTAZAVIAN S, SHABESTARY M M, MOHAMED A R I. Analysis and dynamic performance improvement of grid-connected voltage-source converters under unbalanced network conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8134-8149.
- [9] WU Y K, YE G T, SHAABAN M. Analysis of impact of integration of large PV generation capacity and optimization of PV capacity: case studies in Taiwan[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4535-4548.
- [10] WOYTE A, THONG V V, BELMANS R, et al. Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 202-209.
- [11] 章力,高元海,熊宁,等.考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J].电力系统自动化,2014,38(17):43-48. DOI: 10.7500/AEPS20140509005.
- ZHANG Li, GAO Yuanhai, XIONG Ning, et al. Siting and sizing of distributed photovoltaic power station considering reverse power flow constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 43-48. DOI: 10.7500/AEPS20140509005.
- [12] 张卫国,王会桥.微网中光伏电源容量优化研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(2):51-54.
- ZHANG Weiguo, WANG Huiqiao. Research on photovoltaic power capacity optimization in microgrid[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(2): 51-54.
- [13] 徐林,阮新波,张步涵,等.风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J].中国电机工程学报,2012,32(25):88-98.
- XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.
- [14] 白晓清,吴雪颖,李佩杰,等.计及电压稳定裕度的配电网光伏发电选址与定容[J].现代电力,2015,32(4):34-41.
- BAI Xiaoqing, WU Xueying, LI Peijie, et al. Location and sizing of photovoltaic power generations by considering voltage stability margin of distribution system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(4): 34-41.
- [15] 辛焕海,董炜,袁小明,等.电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
- XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [16] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):2-14.
- DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2-14.
- [17] 张前进,周林,解宝,等.针对电网阻抗的大型光伏并网系统稳定性分析与提高策略[J].电力系统自动化,2017,41(21):127-132. DOI:10.7500/AEPS20170413004.
- ZHANG Qianjin, ZHOU Lin, XIE Bao, et al. Analysis and improvement strategy for stability of large-scale grid-connected photovoltaic system considering grid impedance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 127-132. DOI: 10.7500/AEPS20170413004.
- [18] 董炜,辛焕海,李子恒,等.变流器并网系统振荡与原-对偶复电路分析[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6500-6515.
- DONG Wei, XIN Huanhai, LI Ziheng, et al. Primal-dual complex circuit of grid-connected converters for oscillation analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6500-6515.
- [19] RYGG A, MOLINAS M, CHEN Z, et al. A modified sequence domain impedance definition and its equivalence to the dq -domain impedance definition for the stability analysis of ac power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [20] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of $d-q$ small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [21] 辛焕海,章枫,于洋,等.多馈入直流系统广义短路比:定义与理论分析[J].中国电机工程学报,2016,36(3):633-647.
- XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [22] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [23] 甘德强,杨莉,冯冬涵.电力经济与电力市场[M].北京:机械工业出版社,2010.
- GAN Deqiang, YANG Li, FENG Donghan. Power economy and electricity market [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [24] 徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2006.
- XU Dehong. Power electronic system model and control[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.

黄 锐(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源并网稳定控制。

兰 洲(1980—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统规划与运行。

辛焕海(1981—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:交直流系统及新能源并网系统的稳定性分析与控制。E-mail: xinhh@zju.edu.cn

(编辑 施冬敏 蔡静雯)

Capacity Optimization Method for Multi-infeed Photovoltaic System Based on Generalized Short Circuit Ratio

HUANG Rui¹, LAN Zhou², XIN Huanhai¹, DONG Wei¹, YUAN Hui¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310006, China)

Abstract: Generalized short circuit ratio (gSCR) is able to characterize the small signal stability of multi-infeed system with power electronic devices. Based on the gSCR index, the allocation optimization problem of grid-connected capacity of each feeding point is investigated when the total grid-connected capacity of photovoltaic (PV) devices (or fields) is fixed to make the small signal stability margin of multi-infeed PV system maximized. Firstly, the small signal stability analysis model for multi-infeed PV system is established. Secondly, based on the sensitivity of gSCR to grid-connected PV capacity at each feeding point, a capacity optimization method for multi-infeed PV system is proposed. Finally, with three-infeed PV system as an calculation example, the feasibility and effectiveness of the proposed capacity optimization method are verified. The simulation results show that the reasonable distribution of grid-connected PV capacity accessed to multiple points can effectively enhance the gSCR of multi-infeed PV system and increase the small signal stability margin.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902000), National Natural Science Foundation of China (No. U1766206) and State Grid Corporation of China (No. 52110418000P).

Key words: generalized short circuit ratio (gSCR); multi-infeed photovoltaic system; capacity optimization; sensitivity analysis; equal incremental rate criterion