

计及分布式静态串联补偿器的含新能源电网静态电压稳定性分析

戴 鹏 穆加龙 蒋丽红

常州智成新能源电力科技有限公司 江苏常州 213031

摘 要: 随着我国电网系统不断接入大规模新能源电力,不仅受到了其网架特性约束,而且在新能源装备的自身安全限制下,使得高渗透率的新能源并网后引发了较为严重的静态电压问题,进而成为影响电力系统整体稳定性与安全性的的重要因素。在电力电子器件发展背景下,柔性交流输电技术成为解决上述问题的重要方法,尤其在提升静态电压稳定性、调节线路潮流等方面展现出突出的优势。本文即在此背景下展开研究,深入分析分布式静态串联补偿器在含新能源电网静态电压稳定性调节中的应用价值与方法。

关键词: 分布式静态串联补偿器; 新能源电网; 静态电压; 稳定性

随着我国不同地区新能源电力系统逐步连入电网体系,新能源电力在我国电力系统中的占比不断提升。但是新能源电力必然存在高渗透率的问题,进而成为影响电网系统安全与稳定的关键因素,一旦出现电压崩溃问题,后续必然会引发难以估量的经济损失。因此,在当前新能源电力逐步并网的过程中,如何保证电压稳定就成为必须关注的焦点,本文立足分布式静态串联补偿器,并通过深入评估、分析与实践,提出基于分布式静态串联补偿器的含新能源电网静态电压稳定性调节与保障策略。

1. 分布式静态串联补偿器概述

1.1 结构

分布式静态串联补偿器是一类单相设备,具有潮流控制的主要作用,以分布式柔性交流输电技术为基础,因而可以取消传统设备上的绝缘设计要素,进而通过直接耦合的方式连接输电线路。该设备的容量一般在 0-10kVA 范围内。分布式静态串联补偿器主要由复合开关、含单匝变压器、单相电压源逆变器、滤波器、控制保护、直流电容、通信等模块组成。其主要功能在于可以在输电导线系统中直接接入多个小容量单相逆变器,而通过这些单相逆变器可以有效调节传输线路的阻抗值,进而达到控制有功潮流的效果。

1.2 等效电路

分布式静态串联补偿器可以通过直接耦合的方式连接

输电线路,而在该过程中生成的有功功率 P ,可以由如下公式表示:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

其中 V_1 与 V_2 表示该输电线路首端与末端两个位置的电压, δ 表示首端与末端之间的相角差, X 为该区域范围内的电抗值。

分布式静态串联补偿器完成系统线路的配置后,可以视为在其中增加一个垂直电压,而该过程中生成的有功功率 P' ,可以由如下公式表示:

$$P' = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta - \frac{V_1 V_{DSSC}}{X} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

其中 V_{DSSC} 指的是分布式静态串联补偿器连接输电线路后提供的额外电压。通过计算可以发现,输电线路两端电压值可以近似看做 1.0pu,而两端相角差可以视为无限小,由此可以推出: $\sin \delta \approx \delta$, $\cos(\delta/2) \approx 1$,因此该过程中生成的有功潮流 P'' ,可以由如下公式表示:

$$P'' = \frac{\delta}{X} - \frac{V_{DSSC}}{X}$$

由此不难发现,分布式静态串联补偿器提供的电压对潮流变化有着间接影响,而其只要调节电压值就可以控制潮

流，以此达到提高稳定性的效果。

2. 含新能源电网静态电压稳定性分析

2.1 新能源发电机组的等效模型分析

本文将风电机组作为研究对象，将其并入电网后，可以用以下公式进行描述：

$$\begin{cases} X'_{SG} = \frac{X_{SG}}{1-\eta} \\ X'_w = \frac{\lambda X_{SG}}{1-\eta} \end{cases}$$

其中， X'_{SG} 为风电机组并网后的等值阻抗， X_{SG} 为并网前的等值阻抗， X'_w 为纯风电机组的等值阻抗。 λ 为风电机组并网后的阻抗与并网前机组阻抗的比值， η 为风电机组并网后的渗透率（ $\eta = \text{风电出力} / \text{总出力}$ ）。

2.2 含新能源电网静态电压稳定机理

风电机组、光伏机组等一般通过恒定有功无功功率达成解耦控制目的，由此可以随时调节电压变化。当其接入电网系统后，可以推导出其新能源并网电压 \dot{U}_c 公式：

$$\dot{U}_c = \sqrt{\frac{\dot{U}_S^2}{2} + Q_w X_S \pm \sqrt{\left(\frac{\dot{U}_S^2}{4} - P_w^2 X_S^2 + \dot{U}_S^2 X_S Q_w\right)}}$$

其中， \dot{U}_c 为风电或光伏机组接入电网系统的点电压。由此可以发现，新能源并网后，接入电网的电压越小，电网功率就越大；功率增加，电网节点电压的灵敏度则会提高，从而达到控制电压稳定的效果。

3. 基于分布式静态串联补偿器的电力系统静态电压稳定评估

3.1 计及分布式静态串联补偿器的潮流计算

电力系统简化后可以将其视为一个潮流平衡方程，假设该系统有n个节点，那么就会生成(m-1)个PQ节点，随之产生(n-m)个PV节点，同时还会拥有1个平衡节点，

$$\begin{cases} \Delta P_i = P \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

其中P表示有功功率，Q表示无功功率，i与j表示节点位置，因此 ΔP_i 表示该系统中第i个节点位置的有功功率量， U_i 表示第i个节点位置的电压。 G_{ij} 表示节点i与j之间支路的导纳实部， B_{ij} 则表示对应的虚部， θ_{ij} 表示对应

的相位角差值。

简化后的平衡方程可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$$

其中 ΔP 表示分布式静态串联补偿器耦合后该支路提供的有功功率量，而 ΔQ 则表示对应的无功功率量。H、N、J、L分别为构成雅克比矩阵的向量要素， $\Delta \theta$ 表示该支路的电压相角差， ΔU 表示不同节点之间形成的电压差。

在此基础上将分布式静态串联补偿器配置在电力系统之中，假设位于线路节点i到j支路一侧，并且处于i节点方向一侧，由此对其两端的潮流方程进行优化，可以得到配置了分布式静态串联补偿器的线路传输功率公式：

$$\begin{cases} P_i = g U_i^2 - U_i U_j (g \cos \theta_i + b \sin \theta_i) + \\ U_i U_D [g \cos(\theta_i - \delta_D) + (b + b_c/2) \sin(\theta_i - \delta_D)] \\ Q_i = -(b + b_c/2) U_i^2 - U_i U_j (g \sin \theta_i - b \cos \theta_i) + \\ U_i U_D [g \sin(\theta_i - \delta_D) - (b + b_c/2) \cos(\theta_i - \delta_D)] \end{cases}$$

其中 U_D 为分布式静态串联补偿器耦合输电线路后该段支路的节点电压， δ_D 为该段支路电压形成的相角，g为该段支路的导纳实部，b则为对应的虚部。

基于上述研究不难发现，在新能源并网之后，分布式静态串联补偿器的耦合接入可以对其输电线路整体的运行能力与稳定性产生间接影响，通过调控其接入电压，即可控制其电力系统的运行状态。在此基础上，可以针对恒定容量控制模式展开深层分析。假设HD为分布式静态串联补偿器配置之后的容量实际值，Href为配置分布式静态串联补偿器的容量给定值。那么分布式静态串联补偿器的逆变电压可以通过Href与Imax之间的关系进行表示，其中Href为容量参考值，Imax为串联线路电路额定值。由此可以得到如下公式：

$$H_D - H_{ref} = 0$$

$$U_{max} = \frac{H_{ref}}{I_{max}}$$

其中Umax表示分布式静态串联补偿器配置后的最大逆变电压。由此本文所研究的目标可以转变为：

$$U_D - U_{max} = 0$$

由此可以发现，系统接入分布式静态串联补偿器后会增加两个新的控制变量，而由此即可提升内部运行的约束式与控制目标式，以此达到稳定效果。

3.2 系统静态电压稳定指标

新能源并网对系统潮流特征有着直接影响，而大规模新能源电力对其影响更为突出，甚至会对系统静态电压稳定性产生破坏性影响。在此基础上可以分析，影响静态电压稳定性的因素中，新能源潮流分布是必须关注且解决的核心问题。

因此可以简化其电力系统支路模型，假设在支路 i 到 j 之上， \dot{U}_i 为首节点的电压值， \dot{U}_j 为末节点的电压值，那么 $(R+jX)$ 即表示支路阻抗， B_c 即可表示对地导纳， P 和 Q 即可分别表示支路末端的有功与无功功率。由此可以给出方程：

$$\dot{U}_i = [1 - XB_c/2 + jRB_c/2] \dot{U}_j - (R + jX) \dot{I}_R$$

其中 I_R 表示支路 R 的电流。将其方程简化后可以发现，分布式静态串联补偿器可以通过调节线路的潮流方式，由此产生了改善系统静态电压稳定性的作用。已知电网系统整体的电压稳定性强弱可以通过其节点电压的稳定裕度进行判断，二者之间有着正相关特征。假设当节点末端支路的稳定裕度为零时其支路电压处于临界稳定状态，那么当打破临界状态时，该节点位置就必然会出现电压崩溃问题。同时，该节点发生崩溃后，该输电线路整体形成的平衡节点就会消失。因此，当处于不同运行状态时，电力系统整体线路中电压稳定裕度最低的一个节点，就可以视为整个系统中最容易发生崩溃问题的关键点，只要保证该节点裕度处于安全值范

围内，就可以保证整体系统静态电压的稳定性。

4. 结语

综上所述，通过对分布式静态串联补偿器在含新能源电网系统中的配置分析，可以发现其对于高渗透率新能源电网系统的静态电压稳定性有着一定的调节作用，进而可以达到提升其稳定运行能力的效果，实现控制潮流的目的。一方面，新能源机组并入电网后，必然会面临静态电压稳定性下降问题，而分布式静态串联补偿器可以通过注入功率的方式进行调节，保证薄弱节点电压处于稳定状态。另一方面，分布式静态串联补偿器对于潮流的控制能力与接入节点和薄弱节点位置的距离呈正相关关系，由此可以将其安装在薄弱节点处，可以提升新能源并网安全性与经济性。

参考文献

- [1] 仇晨光, 张振华, 李蓝青等. 计及 DSSC 的含新能源电网静态电压稳定性分析 [J]. 电力建设, 2023, 44(10): 33-40.
- [2] 叶伟豪, 郭强, 赵兵等. 新能源并网换流器功率控制稳定机理分析及改进控制策略 [J/OL]. 高电压技术, 1-9 [2023-12-14]
- [3] 曹帅, 沈凤杰, 葛亚明等. 计及 UPFC 的含新能源电网静态电压稳定性分析 [J]. 可再生能源, 2023, 41(01): 129-134.

本文系常州智成新能源电力科技有限公司的研究成果