风火打捆半波长交流输电系统的谐振分析

陈 畅,杨洪耕
(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:长距离架空输电线、电缆存在较大的对地分布电容,易引起风电并网系统的谐振等问题。为了分析大规模风火打捆半波长交流输电系统的谐波谐振放大特性,基于选择性模态分析,推导得到谐波谐振传输放大解耦矩阵,使用交互参与因子评估谐波扰动源对系统任意节点的激励作用,确定易受谐波传输放大影响的节点。针对实际风电并网系统中含量较大的特征谐波,分析不同风电占比情况下发生谐振时系统各节点的谐波电压响应;引入元件标准化灵敏度及其主导系数,分析综合考虑了各谐振情况后的元件灵敏度,为能够同时抑制多种谐波谐振放大或次谐波谐振提供理论依据。研究表明,风火打捆半波长交流系统中可能发生谐波谐振放大的现象;随着风电占比的增加,谐振频率逐渐降低;35 kV 及 110 kV 电压等级的母线受 7、11 次谐波谐振放大的影响严重,可能危害系统的安全运行;半波长线路首、末端基本不受谐波传输放大的影响,可以安全运行。利用 PSCAD 进行模拟计算,结果验证了所提方法的有效性。

关键词:风火打捆;半波长输电线路;交流输电系统;模态分析;谐波谐振;参与因子;标准化灵敏度
中图分类号:TM 721.2 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.008

0 引言

为了优化国内乃至全球能源分布和市场需求严重失衡的问题,远距离、大容量的输电方式不可避免[1]。而半波长交流输电技术(工频 50 Hz 下的半波长输电线路长度约为 3 000 km)因其独有的经济与技术优势[2],对我国西部能源基地向偏远地区供电或跨国供电都具有很强的竞争力。但随着以风能为代表的可再生能源的大规模并网,大量谐波将注入电网[3];同时,风电场的多逆变器与半波长输电线路分布参数之间的交互影响将增加系统的复杂性,极有可能导致并网系统出现谐振问题,造成严重的电能质量危害。因此,有必要对风电并网下的半波长交流输电系统的谐波谐振进行研究。

文献[4]提出一种基于频长因子极点分布特征的谐波放大分析方法,从数学物理意义的层面证明了:在正常运行情况下,有损半波长交流输电线路可能发生间谐波谐振,而不会发生谐波谐振。文献[5]在此基础上研究了非标准半波长输电线路的谐波传输特征,指出:谐波经长度稍偏离工频半波长度的远距离输电线路传输,可能发生放大现象,从而危害系统的安全运行。但上述结论均是在没有考虑风电并网带来的复杂性的情况下得出的。

文献[6]利用基于特征值分解技术的模态分析法,对多逆变器并网系统的谐振特征进行了分析,为解决实际风电并网系统的电能质量问题提供了理论指导。模态分析法能够有效地揭示谐振的内在机理,反映谐波激励源与响应之间的对应关系[7],但现有研究所考虑的线路长度通常较短,且所研究的系统的送电容量较小。文献[8]对风电孤岛外送的半波长输电系统的谐振特性进行了分析,但对于大容量、远距离输电技术而言,风电孤岛外送方案还有许多亟需解决的问题[9]。此时,采用大规模风火打捆外送是一个优选方案[10],在分析时应考虑风电占比对谐波谐振的影响。

本文搭建了大规模风火打捆经半波长交流输电线路外送的并网系统,分析考虑了不同风电占比情况下半波长交流输电系统的谐振特征。首先,基于模态分析法提出交互参与因子,用于评估谐波扰动源对系统中任意节点的激励作用;然后,对实际风电并网系统中含量较大的特征谐波源在系统各节点的响应进行分析;引入元件标准化灵敏度及其主导系数,综合分析能够同时抑制多种谐波谐振放大的方案;最后,利用 PSCAD 进行模拟计算,对本文所提方法进行分析以证实其有效性,并证明了所提方法能够为风电并网的半波长交流输电系统的规划提供理论指导。

1 模态分析法及元件灵敏度评估

1.1 模态分析的基本原理

对于一个多节点网络系统而言,系统的谐振一般是在某频率 f 下的网络导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 趋于奇异时发生,此时在某节点注入该频率的电流,通过式(1)所示的节点网络方程计算得到的电压向量中的某些元素对应于频率 f 有很大的值[6]。

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{Y}^{-1}\boldsymbol{I} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{I}$ 分别为对应频率下的节点电压和节点注

收稿日期:2018-01-11;**修回日期**:2018-11-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477105)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477105)

入电流矩阵。对 $\boldsymbol{Y}$ 进行特征分解,有:

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{R} \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{\Lambda}=\mathrm{diag}(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_k,\cdots)$ 为特征值对角矩阵;$\boldsymbol{L}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 分别为左特征矩阵和右特征矩阵,并且有 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{R}^{-1}$。

联立式(1)、(2),并设 $\boldsymbol{U}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{V}$ 为模态电压向量,$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{I}$ 为模态电流向量,$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{\Lambda}^{-1}$ 为模态阻抗矩阵,则有:

$$\boldsymbol{U}=\boldsymbol{Z}\boldsymbol{J} \tag{3}$$

可以看出,若 λ_k 为 0 或非常小的数,则 $Z_k=\lambda_k^{-1}$ 很大,于是很小的模态 k 注入电流 $\boldsymbol{J}_k$ 将导致很大的模态电压 $\boldsymbol{U}_k$,这时系统将发生模态谐振。由于各模态之间不存在耦合,故易于识别谐振的位置。

在对大规模风电并网系统进行等效,分析谐波稳态传输特征时,包括模态分析法在内的线性频域分析法仍是目前常用的分析方法。该方法忽略了系统中不同谐波源之间的弱联系,使系统成为能用谐波导纳矩阵表示的线性频率模型,将多个谐波源的交互影响看作是各个谐波源单独作用的结果的叠加,由叠加原理也能看出这种分析方法是合理的。目前,包括 PSCAD、DIgSILENT 等在内的各种电力系统分析软件,在进行谐波稳态模拟计算时也均是采用线性分析方法。在进行具体分析时,将线性元件等值为无源依频阻抗,而将非线性元件等值为谐波源,即可考虑其非线性特征的影响。

1.2　参与因子

根据选择性模态分析,对于某关键模态 k,式(1)可写成:

$$\boldsymbol{V}\approx\lambda_k^{-1}\boldsymbol{l}_k\boldsymbol{r}_k\boldsymbol{I}$$

$$\begin{bmatrix}V_1\\V_2\\\vdots\\V_n\end{bmatrix}\approx\lambda_k^{-1}\begin{bmatrix}l_{1k}r_{k1}&l_{1k}r_{k2}&\cdots&l_{1k}r_{kn}\\l_{2k}r_{k1}&l_{2k}r_{k2}&\cdots&l_{2k}r_{kn}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\l_{nk}r_{k1}&l_{nk}r_{k2}&\cdots&l_{nk}r_{kn}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_1\\I_2\\\vdots\\I_n\end{bmatrix} \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{l}_k$ 和 $\boldsymbol{r}_k$ 分别为矩阵 $\boldsymbol{L}$ 的第 k 列和 $\boldsymbol{R}$ 的第 k 行;l_{ik}、r_{ki}($i=1,2,\cdots,n$)分别为矩阵 $\boldsymbol{L}$、$\boldsymbol{R}$ 的元素;n 为系统中的节点数。

式(4)中矩阵的对角元素 $l_{ik}r_{ki}$($i=1,2,\cdots,n$)为节点 i 的参与因子,即模态 k 下节点 i 的参与因子 $P_{\mathrm{F}ik}$ 为:

$$P_{\mathrm{F}ik}=l_{ik}r_{ki} \tag{5}$$

节点参与因子能够体现谐振的中心位置。为了直观地体现驱动点对其他响应节点的影响,由式(1)—(3)可推导得到当节点 j 注入(间)谐波源 I_j 时,节点 i 的(间)谐波电压 V_i 为:

$$V_i=\sum_{k=1}^{n}Z_kl_{ik}r_{kj}I_j=\sum_{k=1}^{n}Z_k\eta_{ij}^kI_j \tag{6}$$

其中,$\eta_{ij}^k=l_{ik}r_{kj}$ 描述了在模态 k 下节点 j 的激励源对节点 i 状态变量的激励作用,称其为交互参与因子。比较交互参与因子的大小,能够得知易受谐波传输放大影响的节点,分析谐波在电网中的传播扩散距离。

特别地,若 k 为关键谐振模态,即 Z_k 远大于其他所有的模态阻抗,则有:

$$V_i=Z_k\eta_{ij}^kI_j \tag{7}$$

为了使谐波在电网中的传播扩散距离更具可观性,将发生谐振时响应点与驱动点的电压之比表示为:

$$H_{ij}=V_j/V_i\approx\eta_{jj}^k/\eta_{ij}^k=l_{jk}/l_{ik} \tag{8}$$

其中,H_{ij} 为谐波传输比,表示节点注入的谐波扰动源 I_j 在另一节点 i 与该节点之间的响应电压之比,反映了(间)谐波在系统中的传输距离,当 $H_{ij}>1$ 时,谐波电压发生了放大,若节点 j 的谐波扰动源引起了该位置节点的谐波放大,且 $H_{ij}>1$,则节点 i 也发生了谐波放大;若 H_{ij} 很小,则可认为谐波几乎不会传输到节点 i。

1.3　元件灵敏度分析

1.3.1　元件归一化灵敏度

参与因子虽然能够识别各节点谐振的强弱,但是并不能够精确定位谐振发生时系统中的主要参与元件,为此,文献[11]提出了元件灵敏度分析方法,用以分析发生谐振时系统中各元件的参与程度,为通过调整元件的参数来抑制谐振的方法提供理论依据。

元件模态灵敏度矩阵 $\boldsymbol{S}_k=\boldsymbol{l}_k\boldsymbol{r}_k$。设 $Y=G+\mathrm{j}B$ 为节点 i 并联元件的导纳,G 为导纳实部,B 为导纳虚部;$\lambda=\lambda_{\mathrm{x}}+\mathrm{j}\lambda_{\mathrm{y}}$ 为关键模态的特征值,λ_{x} 和 λ_{y} 分别为其实部和虚部;$S=S_{k,ii}=l_{ik}r_{ki}=S_{\mathrm{x}}+\mathrm{j}S_{\mathrm{y}}$ 为节点 i 上并联的某元件在模态 k 下的元件灵敏度,S_{x} 和 S_{y} 分别为其实部和虚部。则元件的归一化灵敏度如式(9)所示。

$$\begin{cases}\left(\dfrac{\partial|Z_k|}{\partial G}\right)^*=\dfrac{\partial|Z_k|/\partial G}{|Z_k|/G}=-\dfrac{G(S_{\mathrm{x}}\lambda_{\mathrm{x}}+S_{\mathrm{y}}\lambda_{\mathrm{y}})}{|\lambda|^4}=-\dfrac{uG}{|\lambda|^3}\\\left(\dfrac{\partial|Z_k|}{\partial B}\right)^*=\dfrac{\partial|Z_k|/\partial B}{|Z_k|/B}=-\dfrac{B(S_{\mathrm{x}}\lambda_{\mathrm{y}}-S_{\mathrm{y}}\lambda_{\mathrm{x}})}{|\lambda|^4}=-\dfrac{vB}{|\lambda|^3}\end{cases} \tag{9}$$

其中,$|Z_k|$ 为模态阻抗幅值;$u=(S_{\mathrm{x}}\lambda_{\mathrm{x}}+S_{\mathrm{y}}\lambda_{\mathrm{y}})/|\lambda|$;$v=(S_{\mathrm{x}}\lambda_{\mathrm{y}}-S_{\mathrm{y}}\lambda_{\mathrm{x}})/|\lambda|$。

设 $Z=R+\mathrm{j}X$ 为节点 i 与 j 之间串联元件的阻抗,R 为阻抗实部,X 为阻抗虚部,$|Z|$ 为阻抗幅值;$S'=S'_{\mathrm{x}}+\mathrm{j}S'_{\mathrm{y}}=S_{k,ii}+S_{k,jj}-S_{k,ji}-S_{k,ij}$ 为节点 i 与 j 之间的串联元件在模态 k 下的元件灵敏度,S'_{x}、S'_{y} 分别为其实部、虚部,$S_{k,ii}=l_{ik}r_{ki}$,$S_{k,ji}=l_{jk}r_{ki}$。于是其灵敏度如式(10)所示。

$$\begin{cases}\left(\dfrac{\partial|Z_k|}{\partial R}\right)^*=\dfrac{\partial|Z_k|/\partial R}{|Z_k|/R}=-\dfrac{R[u(X^2-R^2)+2vRX]}{|Z|^2|\lambda|^3}\\ \left(\dfrac{\partial|Z_k|}{\partial X}\right)^*=\dfrac{\partial|Z_k|/\partial X}{|Z_k|/X}=\dfrac{X[2uRX-v(X^2-R^2)]}{|Z|^2|\lambda|^3}\end{cases}\tag{10}$$

元件在不同谐振模态下的灵敏度的大小、符号可能不同。灵敏度的大小反映元件对谐振的贡献度,在同一谐振频率下,元件的灵敏度越大,则其对谐振的贡献也就越大。符号(正或负)则反映元件参数的变化对模态阻抗变化的影响方向,当元件灵敏度为正时,减小元件参数可以抑制谐振;反之,则增大元件参数可以抑制谐振。

1.3.2 元件标准化灵敏度

含大规模风电并网的半波长输电系统的结构相对复杂。系统中长距离输电线路的对地电容易与系统其他部分的电感元件耦合,形成多谐振点;同时,并网风电占比的变化更是增加了系统谐振频率的多样性。而对于这种有多谐振频率($h=h_1,h_2,h_3,\cdots$)的系统而言,若只针对某一个谐振频率调整某元件的参数,这样虽然能够达到抑制该次谐波谐振的目的,但同时也很有可能会加剧其他频率的谐振。此时,能否通过调整该元件的参数来抑制系统谐振还有待讨论。

为了解决上述问题,找到能够同时抑制各次谐波谐振的方案,应同时考虑各元件在各谐振情况下的参与度。但考虑到同一元件在不同谐振情况下的元件灵敏度的可比性较差,故将归一化灵敏度进行"标准化"处理,即:

$$(S_\alpha^h)^*=\frac{S_\alpha^h}{|S_{\max}^h|}\tag{11}$$

其中,S_α^h 为系统任意元件 α 在某谐振频率 h 下的归一化灵敏度;$|S_{\max}^h|$ 为谐振频率 h 下所有元件的归一化灵敏度中最大的归一化灵敏度的绝对值;$(S_\alpha^h)^*$ 为元件 α 在谐振频率 h 下的标准化灵敏度。标准化灵敏度是绝对值小于等于1的实数,$(S_\alpha^h)^*=\pm1$ 的元件对该频率的谐振有最大的贡献度。

对于具有符号相反的标准化灵敏度的元件 α 而言,为了分析其是否对某频率的谐振具有主导作用,而对其他频率谐振基本没有贡献,进而判断其能否作为谐振抑制的可选方案,首先定义元件 α 在谐振频率 h_1 下标准化灵敏度的主导系数 $\delta_\alpha^{h_1}$ 为:

$$\delta_\alpha^{h_1}=\frac{\|(S_\alpha^{h_1})^*\|}{\sum\|(S_\alpha^h)^*\|}\tag{12}$$

其中,$\|\cdot\|$ 为二范数算子。为了分析元件 α 对 h_1 次谐波谐振的主导程度,判断是否满足式(13)所示条件。若满足式(13)所示条件,则表示该元件 α 在其他任意频率下的标准化灵敏度 $(S_\alpha^h)^*$ $(h\neq h_1)$ 皆远小于主要谐振频率 h_1 下的标准化灵敏度 $(S_\alpha^{h_1})^*$,即元件 α 对频率谐振 h_1 的贡献最大,而相比之下,该元件参数的调整对其他频率谐振的影响可忽略不计。此时可以通过调节元件 α 的参数,使频率为 h_1 的谐振得到抑制的同时,不加重其他频率的谐振,元件 α 能够作为谐振抑制的可选方案。若不满足式(13)所示条件,则调整该元件的参数将不宜用于抑制谐振。

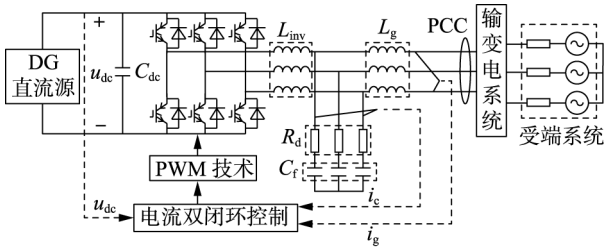
$$|1-\delta_\alpha^{h_1}|\leqslant\varepsilon\tag{13}$$

其中,ε 为工程精度要求。

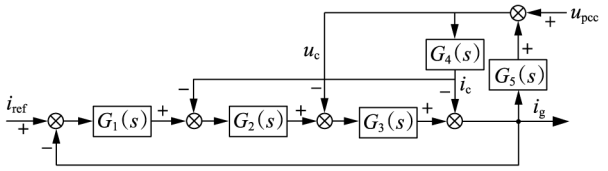
2 大规模风电场并网系统建模

2.1 逆变器并网等效模型

采用双闭环控制策略的含LCL型滤波器的逆变器并网结构及其控制策略如图1所示,其内环采用电容电流反馈控制,外环采用并网电流反馈控制。图1中,R_d、L_{inv}、L_g 和 C_f 分别为滤波电路的串联阻尼电阻、滤波器逆变器侧电感、电网侧的滤波电感以及滤波电容;C_{dc} 为直流侧电容;i_c、i_g 分别为滤波电容电流和并网电流;$G_1(s)$ 为并网电流外环控制传递函数;$G_2(s)=H_cK_p$,H_c 为滤波电容电流内环控制传递函数,K_p 为逆变桥增益;$G_3(s)=1/(sL_{inv})$;$G_4(s)=sC_f$;$G_5(s)=sL_g$;i_{ref} 为参考电流;u_c、u_{pcc} 分别为滤波电容电压和公共连接点(PCC)电压。



(a) 控制结构



(b) 控制策略

图1 单台并网逆变器的控制结构与控制策略

Fig.1 Control structure and strategy of single grid-connected inverter

根据逆变器的控制策略,可推导得到单台含LCL滤波器的并网逆变器的输出导纳为:

$$Y_w=\frac{s^2L_{inv}C_f+sC_fG_2+1}{s^3L_{inv}L_gC_f+s^2G_2L_gC_f+s(L_{inv}+L_g)+G_1G_2}\tag{14}$$

当 m 台参数相同的并网逆变器连接到同一PCC时,多逆变器并网系统可等效为单逆变器并网

系统[6],其等效输出导纳 Y_m 为:

$$Y_m = mY_w \tag{15}$$

2.2　输电线路谐波模型

架空输电线路或电缆的分布参数是影响系统谐振的主要因素之一,为了精确描述长距离或高频率下线路的阻抗特征,采用输电线路的等效 π 模型是十分必要的。尤其是对于输电的电气距离接近一个工频半波的半波长交流输电线路而言,必须考虑其分布参数特性。

根据均匀传输线理论,考虑分布参数的传输线可等效为一个 π 模型,其串联阻抗 Z_s 和并联导纳 Y_p 为:

$$\begin{cases} Z_s = Z_c \sinh(\gamma l) \\ Y_p = \tanh(\gamma l/2)/Z_c \end{cases} \tag{16}$$

其中,$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}$ 为线路的传播常数;l 为线路的长度;$Z_c = \sqrt{Z_0/Y_0}$ 为线路的特征阻抗,考虑线路在高频下的集肤效应,$Z_0 = K_f R_0 + \mathrm{j}hX_0$,$Y_0 = G_0 + \mathrm{j}hB_0$,$h = f/f_0$,$f$ 为谐波频率,f_0 为工频,R_0、X_0、G_0、B_0 分别为线路基波单位长度电阻、电抗、电导和电纳,K_f 为集肤效应系数,可根据文献[12]分别考虑新能源集电缆、送出线和半波长线路各自的集肤效应。

3　风电并网的半波长输电系统谐振分析

3.1　半波长输电系统基本信息

以某实际风电场的拓扑结构为例,搭建特高压半波长交流输电系统,其结构如图 2 所示。各元件参数见附录 A。其中,并网风电机组是单机容量为 1.5 MW 的华锐 SL500 水平轴异步风力发电机[6],每条集电缆连接有 11 台风电机组。

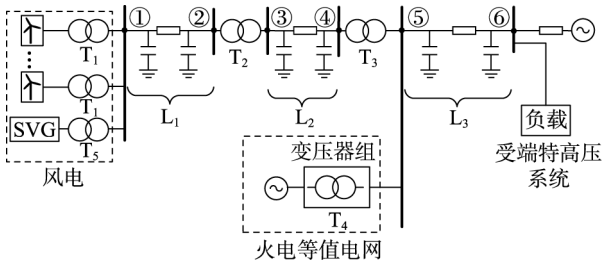


图 2　半波长交流输电系统结构

Fig.2　Structure of half-wavelength AC transmission system

为了考虑风电占比的影响,根据 CIGRE36.05 工作组介绍的谐波模型,将发电机用其次暂态电抗表示,发电机组与变压器组级联后便得到了某特定占比下火电系统的等值阻抗,再将此等值阻抗统一折算至短路容量表示,使火电系统在各占比条件下成为以短路容量表示的等值电网。考虑到火电并网方式的不同,假设等值电网在不发生谐振时呈感性,在各占比下均考虑电网在以下 2 种极限方式下的等值短路容量:

a. 电网全部由额定容量为 388 MV·A 的中等机组发电构成,经多级变压器组升压至特高压;

b. 电网全部由额定容量为 1 000 MV·A 的大机组发电构成,经 27 kV/1 000 kV 变压器一级升压至特高压[13]。

图 3 给出了在某容量 S_w = 99 MW 的风电场出口 35 kV 母线处测得的谐波电流。由图 3 可以看出,风电场并网后主要向 35 kV 电网注入 2、3、5、7、11、13、17、19 等次特征谐波。

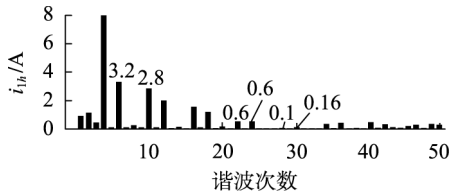


图 3　风电场 35 kV 母线处各谐波电流

Fig.3　Harmonic current at 35 kV bus of wind farms

3.2　并网系统谐振分析

考虑到导纳矩阵的对称性,为了简化表达,可将系统的节点导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 的非零上三角元素列出如下:

$$Y_{ik} = \begin{cases} Y_p + 1/Z_s + Y_{Fi} & i,k = 1,2,\cdots,6 \\ 1/Z_s & i = 1,3,5;k = i+1 \\ 1/Z_T & i = 2,4;k = i+1 \end{cases} \tag{17}$$

其中,Y_{Fi} 为节点 i 所接系统或等值电网的等效导纳,$Y_{F1} = Y_m + Y_{SVG}$,$Y_{F2} = Y_{F3} = Y_{F4} = 0$,$Y_{F5} = Y_G + Y_{T4}$,$Y_{F6} = 1/Z_{sys} + 1/Z_L$,$Y_{SVG}$ 为静止无功发生器(SVG)的等效导纳,Y_G 为火电机组的等值导纳,Y_{T4} 为变压器 T_4 的等值导纳,Z_{sys} 为受端系统的阻抗,Z_L 为负载阻抗;Z_s 为各线路串联阻抗;Y_p 为线路并联导纳;Z_T 为变压器阻抗。对节点导纳矩阵进行特征值分解,得到对角特征值矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}$,便可以求出各模态下的模态阻抗值。

3.3　模态分析结果

利用模态分析法对风火打捆外送情况下的半波长交流输电系统的谐波谐振进行分析,计算中各并网参数均采用标幺值,基准容量 S_B = 100 MV·A。当风电并网且占比分别为 2%、30%、50%时,在火电的 2 种并网方式下,模态分析结果如图 4 所示(图中模态阻抗为标幺值)。基于 2 种火电并网极限方式下的等值短路容量计算得到的模态分析结果相差不大,部分结果见图 4 中括号内的数值,其中加粗的数值对应火电并网极限方式 **a**,另一组数值对应火电并网极限方式 **b**。

间谐波是非整数倍基波频率的分量,它包括频率小于工频 50 Hz 的次谐波(也称为次同步频率分量)和频率高于工频的超谐波[14]。图 4 中的火电采用并网方式 **b** 下的部分超谐波数据如附录 B 中表

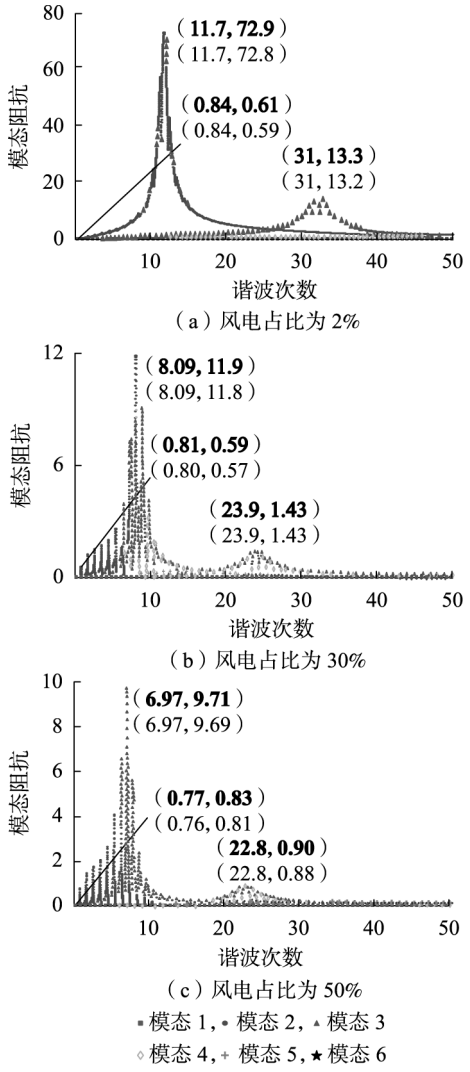


图 4 模态阻抗曲线

Fig.4 Curves of modal impedance

B1 所示。

可以看出,当风电接入半波长输电系统后,系统将出现间谐波和高频谐波谐振点。随着风电占比的增加,谐振频率逐渐降低。由此可以推断,当风机占比在 50%以内时,7—11、23—31 次谐波中的某次谐波可能会发生谐波谐振。

另外,由于双馈风机在扰动电压的作用下能在一定程度上表现为次谐波的发生源[15],当该频率与系统的次谐波谐振频率 38~41 Hz 相匹配时,可能会激励网络,使系统发生次谐波谐振放大。

结合图 3,分析发生次谐波谐振及实际系统中含量较大的几种特征谐波(7、11、23、25 次)谐振时各节点的参与因子值,结果如表 1 所示。

由表 1 可得各节点的谐振参与情况如下。

a. 在 7、11 次谐波谐振频率下,节点 1 的参与因子最大,最容易受激励产生谐振,也最容易观测到谐振,为谐振中心;节点 2、3 的参与因子次之。在 23、25 次谐振频率下,节点 4 的参与因子最大,为谐振中心;节点 1 的参与因子次之。

表 1 各节点参与因子

Table 1 Participation factor of each bus

h	风电占比/%	参与因子					
		节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6
0.835	2	**0.339 8**	0.328 1	0.191 6	0.078 1	0.061 3	0.001 1
0.81	30	0.179 2	0.179 1	**0.281 3**	0.178 4	0.179 5	0.002 5
0.77	50	0.167 0	0.167 2	0.170 3	0.170 3	**0.323 6**	0.001 6
7	47.5	**0.317 6**	0.312 8	0.222 4	0.143 4	0.001 9	0.001 8
11	3.7	**0.431 9**	0.413 7	0.138 1	0.016 1	0.000 1	0.000 1
23	35	0.272 4	0.230 6	0.143 2	**0.346 1**	0.003 9	0.003 8
25	10	0.232 4	0.191 6	0.235 4	**0.338 6**	0.001 0	0.000 9

b. 谐波谐振情况下,节点 5、6 的参与因子都很小,相较于其他节点最不易观测到谐振现象。

c. 随着新能源占比的提高,次谐波谐振频率逐渐降低,最大参与节点逐渐由节点 1 向节点 5 移动,而节点 6 的参与因子始终很小。

3.4 谐波谐振放大分析

3.4.1 谐波放大的交互影响

由图 3 可知,新能源并网后会向 35 kV 母线注入特征谐波,可能会引起谐波谐振放大。结合实际情况,当考虑节点 1 注入主要特征谐波电流而引起谐振时,各节点的交互参与因子如图 5 所示。可以看出,7、23、25 次谐波谐振情况下,节点 2—4 具有较大的交互参与因子,这些节点受到的谐波传输放大影响较大;当发生 11 次谐波谐振时,节点 2、3 的交互参与因子较大,受到谐波传输放大的影响较大;半波长输电线路的首、末端(节点 5、6)基本不受谐波传输放大的影响。

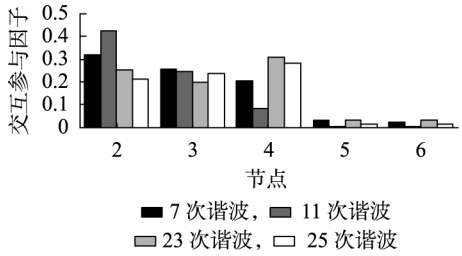


图 5 交互参与因子

Fig.5 Interactive participation factor

3.4.2 谐波传输放大及其验证

根据谐波国家标准给出的同次谐波电流在同一条线路上叠加的计算公式,可以计算在不同风电占比的情况下 35 kV 母线处谐波电流 I_{1h} 的大小,如式(18)所示。

$$I_{1h}=(2+K_h)^{\log_2^x/2}i_{1h} \tag{18}$$

其中,$x=K_pS_t/S_w$,S_t 为系统传输总容量,K_p 为新能源占比;系数 K_h 的取值为 0.72($h=7$)、0.18($h=11$)、0($h>13$),h 为谐波次数。

计算各次谐波在各节点的谐波传输比,并根据不同的风电占比情况计算谐波响应电压的含量,结果如表 2 所示。可以看出,7、11 次谐波经线路传输

表 2　各节点的谐波传输比和谐波响应电压含量

Table 2　Harmonic transfer ratio and response harmonic voltage component of each bus

节点	电压等级/kV	H_{i1}				谐波电压含量/%			
		7	11	23	25	7	11	23	25
1	35	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	3.379 1	3.574 7	0.028 9	0.049 2
2	35	0.992 3	0.978 7	0.920 1	0.907 9	3.379 1	3.574 7	0.028 9	0.049 2
3	110	0.836 8	0.565 4	0.725 2	1.006 4	2.830 4	2.021 3	0.021 7	0.049 5
4	110	0.671 9	0.193 1	1.127 2	1.207 0	2.273 2	0.690 4	0.033 0	0.059 3
5	1 000	0.078 3	0.011 1	0.119 9	0.064 8	0.264 9	0.039 8	0.003 5	0.003 2
6	1 000	0.076 3	0.010 9	0.118 3	0.063 9	0.258 1	0.039 0	0.003 5	0.003 1

注:表头中数据为谐波次数。

没有放大,但并网驱动点处的该次谐波电流注入较大,使节点 1—4 有较高的 7 次谐波响应电压含量。考虑到国家标准中关于谐波的规定,35 kV 公用电网中的奇次谐波电压含有率的限值为 2.4%,110 kV 及以上电压等级的电网中谐波电压含有率的限值为 1.6%,故当发生 7 次谐波谐振时,节点 1—4 的谐波响应电压含量将会超标,应予以控制。同理,当发生 11 次谐波谐振时,节点 1—3 的谐波响应电压含量也将超标。

当发生 23 或 25 次谐波谐振时,谐波经线路传输后在节点 4 出现了最大谐波电压放大,但该次谐波电流注入含量较低,因此系统中任意节点的谐波电压含量均未超标。

PSCAD 是一种能够进行电力系统时域和频域计算的软件,具有强大的电力系统分析功能,已经在电力系统谐波分析等领域得到了广泛的应用[16];它拥有精确和完整的电力系统元件库,能根据不同的情况自定义搭建符合要求的风电等模型。其中,输电线路的“频率相关相位模型”是线路分布参数模型,考虑了参数的频率相关性,能反映导线的高频集肤效应,在用于分析非换位和理想换位线路谐波行为的可用模型中具有最高的数值精度[17]。故对于本文研究的稳态谐波谐振问题,PSCAD 能够保证其有效性。

因此,为了验证计算结果,在 PSCAD 中搭建模型进行模拟计算,得到几种情况下各节点的谐波电压含量如图 6 所示。可以看出,仿真结果与模态分析结果一致,7、11 次谐波在发生谐振时易在节点 1—4 引起传输放大,导致 35 kV、110 kV 电网 PCC 处的谐波电压含量超标。应注意对 7、11 次谐波的谐振加以抑制。

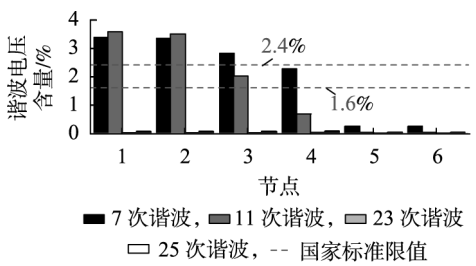


图 6　节点谐波电压含量

Fig.6　Harmonic voltage component of buses

3.4.3　灵敏度分析

为了评估系统元件对谐波放大的参与度,图 7(a)给出了各谐振频率下模态阻抗对元件参数的灵敏度(图中 qr 表示元件 q 参数的实部,qi 表示元件 q 参数的虚部,$q=1,2,\cdots,12$)。可以看出,同一元件在不同谐振频率下的灵敏度数量级不同,可比性较差,需要对其进行“标准化”处理。

图 7(b)为元件的标准化灵敏度。可以看出,当发生 7 次谐波谐振时,集电缆 L_1、送出线 L_2 的并联导纳以及变压器 T_3 的灵敏度较大,是对谐波谐振放大参与程度较大的元件参数;当发生 11 次谐波谐振时,对谐波谐振放大参与程度较大的元件参数为集

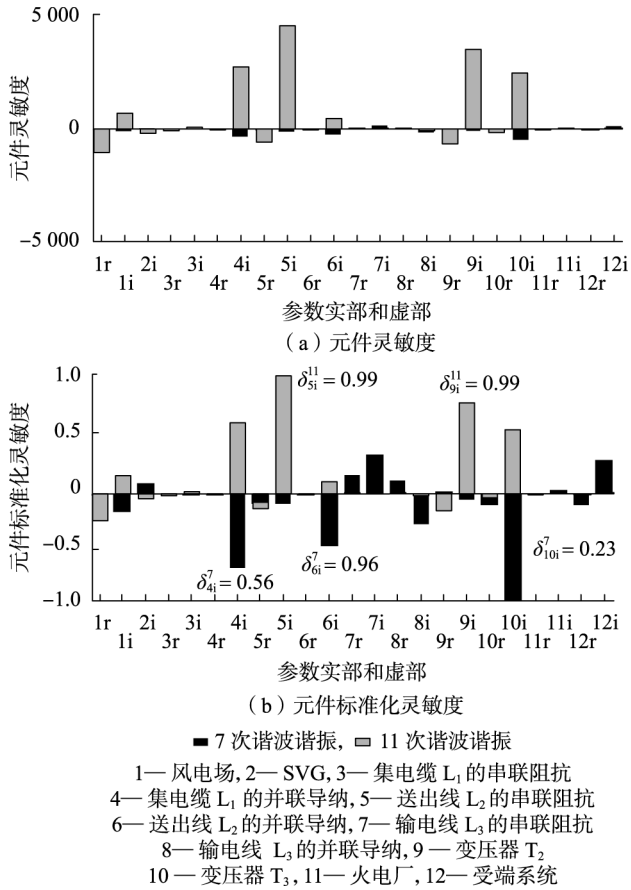


图 7　谐波谐振时的元件灵敏度分析

Fig.7　Component sensitivity analysis of harmonic resonance

电缆 L_1 的并联导纳、送出线 L_2 的串联阻抗以及变压器 T_2 和 T_3。集电缆 L_1 与送出线 L_2 的对地电容大,使 L_1、L_2、T_2 与 T_3 发生了感容耦合,引起了谐波谐振放大。

考虑 $\varepsilon=5\%$,在图7(b)中标出了部分元件标准化灵敏度的主导系数。可以看出,虽然集电缆 L_1 的并联导纳及变压器 T_3 对7、11次谐波谐振放大都有较大的参与度,但主导系数均不满足式(13)所示条件,所以通过调整这2种元件参数使7次谐波的模态阻抗减小,则可能会同时引起11次谐波谐振放大加剧。应优先选择增加送出线 L_2 的并联导纳来抑制7次谐波、减小送出线 L_2 的串联阻抗来抑制11次谐波谐振放大。

基于以上分析可知,使用一种并联导纳较大、串联阻抗较小的输电线路代替原有的架空送出线 L_2 可以同时抑制7、11次谐波谐振。例如,电缆线路的串联阻抗相对架空线较小,而并联导纳远大于架空线,满足谐振抑制条件,故可使用110 kV电缆代替原有架空输电线路。替换后各节点的谐波电压含量如图8所示。可以看出,谐波谐振放大得到了很好的抑制。

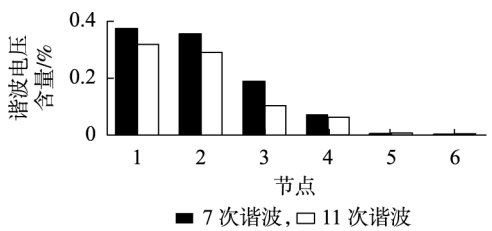


图8 节点谐波电压含量

Fig.8 Harmonic voltage component of buses

3.5 次谐波谐振分析

由3.3节的模态分析结果可知,除了谐波,系统中还存在次谐波谐振频率,可能引起次同步谐振。计算风电占比分别为2%、30%、50%的半波长输电系统发生次谐波谐振时,各节点对驱动点(节点1)的次谐波传输比,结果见表3(表中各节点的电压等级同表2中)。可以看出,随着风电占比的提高,节点2—5的谐波传输系数逐渐大于1,110 kV母线和半波长线路首端出现了次同步频率分量的谐振放大。即:次谐波将在系统中按照阻抗特性传播并被扩散和放大,在半波长线路首端(节点5)可能出现被放大的次同步频率分量,激发机组轴系大幅扭振,引发发电机组的次同步振荡[18];而次同步频率分量将不会传递到半波长输电线路末端,对受端系统几乎无影响。

表3 各节点的次谐波传输比

Table 3 Subharmonic transfer ratio of each bus

h	风电占比/%	次谐波传输比					
		节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	节点6
0.835	2	**1.000 0**	0.989 6	0.868 1	0.702 6	0.633 9	0.084 1
0.81	30	1.000 0	0.999 9	**1.711 0**	0.998 0	1.000 7	0.111 1
0.77	50	1.000 0	1.000 5	1.619 1	1.008 3	**2.406 1**	0.089 2

元件的标准化灵敏度如图9所示。可以看出,当并网新能源占比较小时,L_2、T_2、T_3、L_3 均对谐振有较大的参与度,但当占比提高时,L_2、T_2 及 T_3 的灵敏度降低,谐振主要由 L_3 的并联导纳及串联阻抗的耦合产生,这与前述参与因子的分析结果一致。综合0.835、0.81、0.77次谐波谐振情况下元件灵敏度的分析结果可知,为了抑制次谐波谐振,可选择并联导纳较小的半波长输电线路。

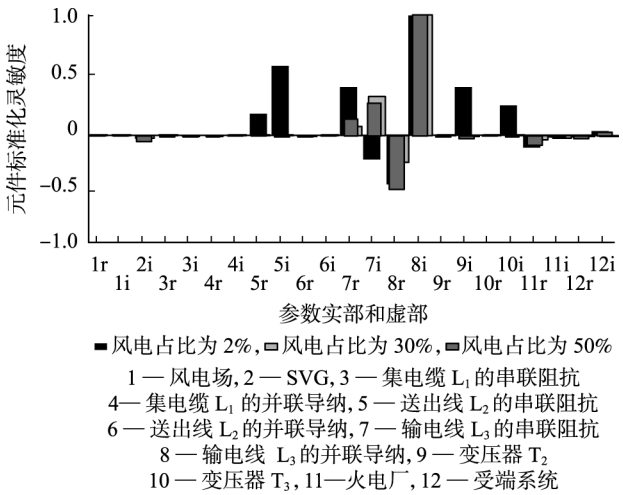


图9 次谐波谐振时的元件灵敏度分析

Fig.9 Component sensitivity analysis of subharmonic harmonic resonance

4 结论

a. 风火打捆外送的半波长交流输电系统存在多个谐振频率,包括谐波、间谐波(次谐波与超谐波)。随着风电占比的增加,谐振频率将逐渐降低。

b. 当新能源占比在50%以内时,系统可能发生7、11、23、25次特征谐波谐振,并在系统中发生传输放大。其中,风电机组出口处是7、11次谐波的传输放大中心,该点最容易受到谐波传输放大的影响。发生谐振时,35 kV、110 kV电网的谐波电压含量可能超标,危害电网安全。此时,通过调整送出线的线路参数能够同时有效地抑制7、11次谐波谐振。另外,110 kV电网为23、25次谐波的传输放大中心,但这些高次谐波在系统中响应的谐波电压含量在国家标准限值以内,可以安全运行。

c. 风火打捆外送的半波长交流输电系统存在次谐波谐振点,可能引发次谐波谐振放大。110 kV电压等级的电网及半波长线路首端将受到较大的影响,可能导致并网火电系统中的火电机组发生次同步振荡;但是次同步频率分量将不会传递到半波长输电线路末端,对受端系统几乎没有影响。系统的

次谐波谐振放大可通过调整半波长输电线路参数来加以抑制。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 邓旭,王东举,沈扬,等. ±1 100 kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):133-140.
DENG Xu,WANG Dongju,SHEN Yang,et al. Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan ±1 100 kV UHVDC power transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):133-140.

[2] 杨冬,刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):1-5.
YANG Dong,LIU Yutian. Preliminary discussion on China transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):1-5.

[3] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei,AI Xin,WU Tao,et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26-32.

[4] 周胜军,陈畅,谈萌,等. 基于频长因子极点分布特征的半波长交流输电线路谐波传输特性分析[J]. 高电压技术,2018,44(1):51-58.
ZHOU Shengjun,CHEN Chang,TAN Meng,et al. Harmonic transmission characteristic analysis of halfwavelength AC transmission line based on pole distribution feature of frequency-length factor[J]. High Voltage Engineering,2018,44(1):51-58.

[5] 陈畅,杨洪耕,谈萌. 非标准半波长交流输电线路谐波传输特性分析[J]. 电网技术,2018,42(5):1580-1587.
CHEN Chang,YANG Honggeng,TAN Meng. Harmonic transmission characteristic analysis of non-standard half-wavelength AC transmission line[J]. Power System Technology,2018,42(5):1580-1587.

[6] 唐振东,杨洪耕. 基于模态分析的风电场并网谐波谐振研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):87-92.
TANG Zhendong,YANG Honggeng. Harmonic resonance research based on modal analysis for grid-connected wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(3):87-92.

[7] 李杨,程莹,刘洋,等. 基于奇异值分解理论的谐波放大分析方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):16-21.
LI Yang,CHENG Ying,LIU Yang,et al. Analytic method of harmonic amplification based on singular value decomposition theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(8):16-21.

[8] 谈萌,彭祥华,王同勋,等. 基于模态分析的半波长交流输电系统与风电场并网谐振研究[J]. 高电压技术,2018,44(1):90-98.
TAN Meng,PENG Xianghua,WANG Tongxun,et al. Study on the harmonic resonance of grid-connected of wind farms and half-wavelength AC transmission system based on modal analysis method[J]. High Voltage Engineering,2018,44(1):90-98.

[9] 汤奕,赵丽莉,郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):34-40.
TANG Yi,ZHAO Lili,GUO Xiaojiang. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(20):34-40.

[10] 林俐,吴聪聪,齐军. 大规模风火混合送端系统严重故障下的紧急切机策略分析[J]. 电网技术,2016,40(3):882-888.
LIN Li,WU Congcong,QI Jun. Analysis of urgent generator tripping control under serious fault for sending-end system of bundled thermal/wind power[J]. Power System Technology,2016,40(3):882-888.

[11] HUANG Z Y,CUI Y,XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(1):222-231.

[12] WU X G,SADULLAH S,MATTHEWS B,et al. Nodal harmonic impedance derivation of AC network in PSS/E[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2011:1-5.

[13] 赵良,郭强,宋云亭,等. 发电厂接入特高压系统方式研究[J]. 电网技术,2011,35(3):94-97.
ZHAO Liang,GUO Qiang,SONG Yunting,et al. Study on the connection mode of power plant to UHV power system[J]. Power System Technology,2011,35(3):94-97.

[14] 程浩忠. 电能质量概论[M]. 北京:中国电力出版社,2013:228.

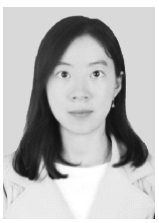
[15] 肖湘宁,罗超,廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报,2017,32(6):85-97.
XIAO Xiangning,LUO Chao,LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(6):85-97.

[16] 蒋建东,周挥毫. 基于 PSCAD 的交直流电力系统故障仿真[J]. 微计算机信息,2009,25(10):241-242.
JIANG Jiandong,ZHOU Huihao. AC/DC power grid fault simulation based on PSCAD[J]. Microcomputer Information,2009,25(10):241-242.

[17] 乐健,胡仁喜. PSCAD X4 电路设计与仿真从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2015:200.

[18] 李明节,于钊,许涛,等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术,2017,41(4):1035-1042.
LI Mingjie,YU Zhao,XU Tao,et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology,2017,41(4):1035-1042.

作者简介:



陈　畅

陈　畅(1992—),女,辽宁抚顺人,博士研究生,主要研究方向为谐波分析与建模(**E-mail**:412355373@qq.com);

杨洪耕(1949—),男,四川成都人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、智能电网等(**E-mail**:pqlab99@126.com)。

(下转第 64 页 continued on page 64)

[20] 陈雁,文劲宇,程时杰. 电网规划中考虑风电场影响的最小切负荷量研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):20-27.
CHEN Yan,WEN Jinyu,CHENG Shijie. Minimum load-curtailment in transmission network planning considering integrated wind farms [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(34):20-27.

作者简介:

张 尚(1991—),女,河南郑州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用(**E-mail**:zhangshang@ncepu.edu.cn);



张 尚

顾雪平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用(**E-mail**:xpgu@ncepu.edu.cn);

王 涛(1976—),男,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制和智能技术在电力系统中的应用(**E-mail**:wtwxx@126.com)。

Static security corrective control method of wind power-integrated system based on distributional robust optimization

ZHANG Shang,GU Xueping,WANG Tao

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract:A static security corrective control method for power system is proposed with the consideration of wind power uncertainties. In order to rationally connect with wind power forecasting method,the range and mean value of wind power output are used to describe the uncertainties. An active power security corrective control model is established with the consideration of wind power fluctuations,which takes the minimum economic cost of adjustment measure as its objective,and considers two control measures of generator output adjustment and load shedding. On the basis of distributional robust linear optimization theory,the corrective control model with uncertainty parameters is converted to robust peer-to-peer model only with certainty parameters,which is solved by linear programming method. The case results of a regional power grid show that the corrective control scheme obtained by the proposed model can deal with various wind power fluctuations,meanwhile,the model can realize the transition between economy and robustness of control strategy,and give corresponding possibility evaluation of robustness degree for control strategies.

Key words:wind power;corrective control;uncertainty;distributional robust linear optimization

(上接第57页 continued from page 57)

Harmonic resonance analysis for wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system

CHEN Chang,YANG Honggeng

(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract:Large distributed capacitors between ground and long distance overhead transmission lines and cables can easily cause the harmonic resonance problems for the grid-connected wind power system. In order to analyze the harmonic resonance amplification characteristics of the large-scale wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system,the decoupling matrix of harmonic resonance transmission and amplification is derived based on the selective modal analysis. The interactive participation factor is used to evaluate the excitation effect of harmonic disturbance sources on any nodes in the system,and to determine the nodes which are easily affected by the harmonic resonance transmission and amplification. The harmonic response voltage of each node caused by the characteristic harmonics,which have larger contents in the actual grid-connected wind power system,is analyzed according to the different proportions of wind power when the resonance happens. The standardized sensitivity and its dominant coefficient are introduced to analyze the element sensitivity with a comprehensive consideration of various resonance conditions,which can provide a theoretical basis for suppressing multiple harmonic resonance amplification or subharmonic resonance simultaneously. Simulation shows that,there may have harmonic resonance amplification in the wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system. As the proportion of wind power increases,the resonance frequency decreases gradually. The 7th and 11th harmonic resonance amplifications have serious influences on the 35 kV and 110 kV buses,which may endanger the safe operation of the system. The head and end of the half-wavelength transmission line are not affected by the harmonic resonance transmission and amplification and can operate safely. The simulation is carried out with PSCAD to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words:wind-thermal-bundled;half-wavelength transmission line;AC transmission system;modal analysis;harmonic resonance;participation factor;standardized sensitivity

附录 A

（1）风电场元件。

a. LCL 滤波器：逆变器侧电感为 0.025 mH，额定电流为 500 A，电网侧电感量为 0.4 mH，额定电流为 205 A，滤波电容参数为 33.4 μF，额定电压为 1075 V，滤波电阻为 1 Ω。

b. 静止无功发生器（SVG）：变比为 10 kV/35 kV，额定容量为 6.3 MV·A，短路阻抗为 6%。

c. 箱变 T_1：变比为 0.69 kV/35 kV，额定容量 S_{N1}=3.3 MV·A，短路阻抗 U_{d1}=6.6%。

d. 高压变压器 T_2：变比为 35 kV /110 kV，额定容量 S_{N2}=50 MV·A，短路阻抗 U_{d2}=10.73%。

e. 特高压变压器 T_3：变比为 110 kV/1000 kV，额定容量 S_{N3}=1000 MV·A，短路阻抗 $U_{d3(1-2)}$=21%，$U_{d3(1-3)}$=62%，$U_{d3(2-3)}$=40%。

f. SVG 连接变压器 T_5：变比为 10 kV/35 kV，额定容量 S_{N5}=6.3 MV·A，短路阻抗 U_{d5}=6%。

（2）火电系统元件。

a. THDF125/67 汽轮发电机：额定电压为 27 kV，额定容量为 1000 MV·A，额定功率为 900 MW，次暂态电抗 X_d''=15.9/22%；变压器 T_4 的变比为 27 kV/1000 kV，额定容量 S_{N4_1}=1000 MV·A，短路阻抗 U_{d4_1}=18%。

b. QFSN−330−2 汽轮发电机：额定电压为 20 kV，额定容量为 388 MV·A，额定功率为 330 MW，次暂态电抗 X_d''=17.4%；变比为 20 kV/110 kV 的变压器组的额定容量 S_{N4_2}=180 MV·A，短路阻抗 U_{d4}=14%；变比为 110 kV/1000 kV 的变压器组的额定容量 S_{N4_3}=1000 MV·A，短路阻抗 $U_{d3(1-2)}$=21%，$U_{d3(1-3)}$=62%，$U_{d3(2-3)}$=40%。

（3）半波长输电线 L_3。

单位长度参数 R_{0_3}=0.0081 Ω/km，X_{0_3}=0.2615 Ω/km，B_{0_3}=4.328×10^{-6} S/km，自然半波长度 l=λ_{0_3}/2=2938 km，自然功率 P_{zr}=4000 MW

（4）送出线 L_2。

R_{0_2}=0.131 Ω/km，X_{0_2}=0.401 Ω/km，B_{0_2}=2.84×10^{-6} S/km，长 50 km。

（5）集电缆 L_1。

R_{0_1}=0.128 Ω/km，X_{0_1}=0.133 Ω/km，B_{0_1}=5.34×10^{-5} S/km，长 10 km。

（6）负荷。

P_L=P_{zr}=4000 MW，功率因数 cosθ=0.98。

（7）电网。

短路容量 S_{SC}=60000 MV·A。

附录 B

表 B1 超谐波的模态分析相关数据

Table B1 Related data for modal analysis of superharmonics

风电占比/%	频率/Hz	模态阻抗	风电占比/%	频率/Hz	模态阻抗	风电占比/%	频率/Hz	模态阻抗
	85.5	1.270		83.75	1.236		81.25	1.519
	131	1.804		129.3	1.538		127	1.811
	177.5	2.333		176	1.735		173.8	2.093
2	225	2.969	30	223.3	2.033	50	220.8	2.671
	273	3.781		270.8	2.631		267	4.103
	321.3	4.878		317.8	4.000		310.8	7.410
	370	6.463		363.3	7.342		348.5	9.705

注：表中模态阻抗为标幺值。