

引用格式:韩宇,周前,李勇,等.户用光伏接入的低压配电网电能质量问题分析与附加损耗量化评估[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):177-186.

Citation: HAN Yu, QIAN Zhou, YONG Li, et al. Analysis of power quality issues and quantitative evaluation of additional losses in low voltage distribution networks connected to household photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 177-186.

户用光伏接入的低压配电网电能质量问题 分析与附加损耗量化评估

韩宇¹, 周前², 李勇¹, 卞欣科¹, 邓威³, 安海云², 张传文¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏南京 211103;

3. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410017)

摘要:针对户用光伏的大量无序接入导致低压配电网附加损耗严重增大的问题,对配电网附加损耗的量化分析是实现电力系统节能降损的必要途径之一。以户用光伏接入电网后的附加损耗为对象,研究考虑户用光伏发电与配电线路附加损耗的量化关系。首先,对户用光伏接入下附加损耗的变化表征进行理论分析,建立有源低压配电网三相四线制等效电路与数学模型;然后,研究户用光伏不同容量与接入相序下的多类型电能质量扰动情况,建立复合电能质量扰动附加损耗模型;最后,依据典型日的光伏出力功率曲线与附加损耗模型,通过算例分析并验证了所提长时间尺度下户用光伏对配电网附加损耗的量化评估方法的准确性。

关键词:户用单相光伏;低压配电网;电能质量问题;附加损耗;长时间尺度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.020 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2024)03-0177-10

Analysis of power quality issues and quantitative evaluation of additional losses in low voltage distribution networks connected to household photovoltaics

HAN Yu¹, ZHOU Qian², LI YONG¹, BIAN Xinke¹, DENG Wei³, AN Haiyun², ZHANG Chuanwen¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Electric Power Research Institute,

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 3. Electric Power Research Institute,

State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410017, China)

Abstract: Quantitative analysis of additional losses in low-voltage distribution networks is one of the necessary ways to achieve energy conservation and loss reduction in power systems, in response to the serious increase in additional losses caused by the disorderly access of household photovoltaics. This paper focuses on the quantitative relationship between the additional losses of household photovoltaic power generation and distribution lines after being connected to the power grid. Firstly, a theoretical analysis is conducted on the changes in characterization of additional losses for household photovoltaic (PV) access. An equivalent circuit and mathematical model are established for active low-voltage distribution networks with three-phase four-wire systems. Secondly, the study investigates the disturbance of multiple types of power quality under different capacities and phase sequences of household PV and establishes a composite power quality disturbance additional loss model. Finally, based on the typical daily PV power output curve and additional loss model, the accuracy of the proposed quantification evaluation method for household PV's additional losses in distribution networks is analyzed and verified through case studies.

Key words: residential single-phase photovoltaic; low-voltage distribution network; power quality issues; additional losses; long-time scale

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202318203A-1-1-ZN)

通信作者: 李勇(1982—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事能源电力系统稳定性分析与控制、电能变换系统与装备、电能质量分析与控制等方面的研究; E-mail: yongli@hnu.edu.cn

近年来,中国分布式新能源发电总量呈现上升趋势,但因其输出功率的随机性、波动性与间歇性以及功率变换器的非线性特点,会在配电网中产生严重的电能质量问题,如谐波畸变、三相不平衡、电压偏差等^[1-2],导致由各种电能质量问题所产生的配电网附加损耗持续增加^[3]。因此,在户用光伏接入低压配电网的背景下揭示电能质量问题对附加损耗的影响机理在损耗计算精度提升与配电网节能降损等方面具有指导意义。

目前在有源配电网的电能质量问题与其产生损耗的影响机理研究方面,主要包括光伏等分布式电源按不同容量或接入位置对中低压配电网多种电能质量影响与附加损耗分析^[4-5]。结合分布式电源中的电力电子装置工作特性,文献[6]推导并建立分布式电源在低压配电网中的并网模型,通过实际多节点链式配电网算例验证,得出非线性分布式电源的接入情况与系统的电压电流波形畸变程度的作用关系;文献[7]针对光伏电源引入后的配电网潮流变化情况,从网络损耗、谐波畸变和短路故障、电压偏差4个方面研究在用户侧接入光伏后对配电网的影响;根据含分布式光伏电源辐射状配电网结构特点;文献[8]采用前推回代潮流计算方法,得出各节点的电压偏差与电网附加损耗的关联性特征;文献[9]建立了某典型光伏并网台区的配电网模型,探究光伏不同注入容量及接入位置与配电网电压偏差及网损的影响;文献[10]围绕电力谐波在低压配电网中产生损耗现状,分析谐波对变压器绕组和线路电阻的影响机理,提出了计及谐波因素的配电网损耗计算模型;文献[11]将配电网损耗划分为固定损耗与可变损耗,并通过建立配电网损耗计算模型进行实验验证,实现各电能质量扰动下的配电网损耗的量化评估。

综上所述,目前的国内外研究多从单一电能质量扰动对有源配电网损耗的影响角度分析,并主要聚焦于谐波或三相电流不平衡的分析及相应的治理措施方面。然而,在实际运行场景中,针对同时包含谐波畸变、三相不平衡以及电压偏差的电能质量扰动下配电网附加损耗的系统性量化研究较少。因此,本文在分别建立了无电能质量干扰下的低压配电网理想运行模型和单种及复合电能质量引起的附加损耗模型基础上,推导了户用光伏接入低压配电网下的复合电能质量附加损耗数学模型,构建了户用光伏的不同接入容量、不同接入相序与复合电能质量扰动产生的附加损耗仿

真模型,并通过仿真得到验证,阐明了户用光伏接入下的低压配电网对电能质量扰动产生附加损耗的影响机理。

1 含光伏的三相四线制低压配电网的附加损耗模型

1.1 分布式光伏接入的低压配电网附加损耗分析

在传统配电网中,以 S_U 表示配电网用户侧单相负荷所消耗的总视在功率,且用 P_U 与 Q_U 表示对应的有功功率与无功功率基于母线相电压 U 已知的前提下可计算流入用户侧负荷的单相电流 I_L 为

$$I_L = \frac{S_U}{U} = \frac{P_U + jQ_U}{U} \quad (1)$$

当低压配电网各相的用户侧负荷均处于额定状态且配变侧电压恒定时,可假定线路上的各节点电压相等,此时单相光伏接入后对节点电压幅值影响可忽略不计^[12-14]。对于未接入分布式光伏的传统低压配电网损耗 ΔS 为

$$\Delta S = \frac{R_{TG}(P_U^2 + Q_U^2)}{U^2} \quad (2)$$

户用光伏并联于用户负荷侧且等效为电流源,连接三相各相线路与中性线形成闭合回路如图1所示。推导单相光伏接入配电网的电流方程为

$$\begin{aligned} \dot{i}_m(t) = \frac{1}{U'_m} \{ & [P_{pv,m}(t) + P_{load,m}(t)] \\ & - j[Q_{pv,m}(t) - Q_{load,m}(t)] \} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\dot{i}_m(t)$ 为低压配电网在 t 时刻的线路电流; $P_{pv,m}(t)$ 、 $P_{load,m}(t)$ 分别为 t 时刻的单相光伏与用户侧负荷的有功功率; $Q_{pv,m}(t)$ 、 $Q_{load,m}(t)$ 分别为 t 时刻的单相光伏与用户侧负荷的无功功率; U'_m 为对应各相的额定电压共轭值; m 为a、b或c相的相序。

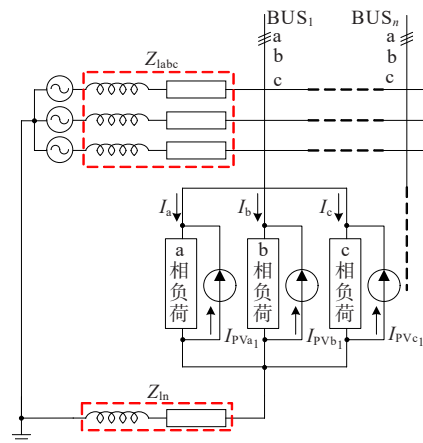


图1 含单相光伏低压配电网用户侧电路等效模型

Figure 1 Equivalent model of user side circuit in single phase photovoltaic low voltage distribution network

配电线路的附加损耗为

$$\Delta S_{\text{TG}} = \frac{R_{\text{TG}}}{U^2} (P_U - P_G)^2 + (Q_U - Q_G)^2 \quad (4)$$

结合式(2)、(4)可得,单相光伏并网的线路损耗变化量为

$$\Delta S' = \Delta S_{\text{TG}} - \Delta S = \frac{R_{\text{TG}}}{U^2} \cdot [P_G(P_G - 2P_U) + Q_G(Q_G - 2Q_U)] \quad (5)$$

对式(5)进行分析可知,含光伏的单相线路损耗变化量 $\Delta S'$ 与单相光伏接入的容量以及输出功率有关:

$$\begin{cases} \Delta S' > 0, P_G > 2P_U \\ \Delta S' < 0, P_G < 2P_U \\ \Delta S' = 0, P_G = 2P_U \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)知,在低压配电网处于理想对称运行下,假定分布式光伏并网点前后的用户负荷侧的功率因数相等,则当单相光伏接入的输出功率小于2倍的用户侧负荷容量时有助于降低理论附加损耗,可得含光伏低压配电网的三相线路理论附加损耗:

$$\Delta S'_{3L} = 3 \times (\Delta S_{\text{TG}} - \Delta S) = \frac{3R_{\text{TG}}}{U^2} \cdot [P_G(P_G - 2P_U) + Q_G(Q_G - 2Q_U)] \quad (7)$$

1.2 低压配电网的三相四线制线路模型

通常采用 π 型等效电路模型对三相四线制线路结构进行建模,配电网线路模型如图2所示。基于基尔霍夫定律,得出低压配电网三相四线制的 π 型线路结构方程:

$$\begin{bmatrix} U_{abc,x} \\ I_{abc,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(Z, Y) & B(Z, Y) \\ C(Z, Y) & D(Z, Y) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_{abc,y} \\ I_{abc,y} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A(Z, Y) = D(Z, Y) = I + \frac{l^2}{2} Z_{abcn} Y_{abcn} \\ B(Z, Y) = -lZ_{abcn} \\ C(Z, Y) = -lY_{abcn} + \frac{l^3}{4} Y_{abcn} Z_{abcn} Y_{abcn} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $U_{abc,x}$ 、 $I_{abc,x}$ 分别为节点 x 的四线电压与电流; $U_{abc,y}$ 、 $I_{abc,y}$ 分别为节点 y 的四线电压与电流; $A(Z, Y)$ 、 $B(Z, Y)$ 、 $C(Z, Y)$ 、 $D(Z, Y)$ 分别为结构方程系数; l 为三相四线制的线路长度; Z_{abcn} 、 Y_{abcn} 分别为单位线路的阻抗值与导纳值。

图2中,a、b、c、n为三相线与中性线; U_x 、 I_x 、 U_y 、 I_y 分别为各线路的始端电压、始端电流、末端电压、末端电流; Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} 、 Z_{nn} 分别为三相以及中性线的自阻抗; Z_{ab} 、 Z_{ca} 、 Z_{cn} 等分别为三相以及中性线间的互阻抗; I_{ia} 、 I_{ib} 、 I_{ic} 、 I_{in} 为各线路电流。

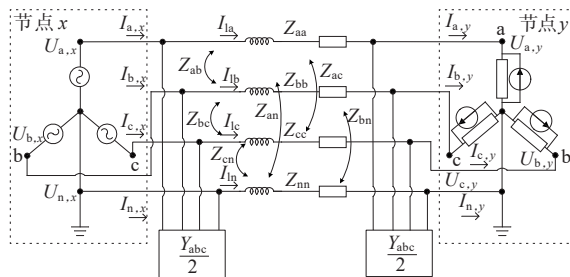


图2 三相四线制配电系统典型接线示意

Figure 2 Typical wiring diagram of three-phase four-wire distribution system

2 电能质量扰动的含光伏低压配电网附加损耗分析

2.1 计及三相不平衡的有源配电网损耗分析

当户用光伏并网时,各相电流满足以下关系:

$$I_{GU,m} = I_{\text{TG},m} + I_{G,m} \quad (10)$$

式中, $I_{GU,m}$ 为单相用户侧负荷的流经电流; $I_{\text{TG},m}$ 为单相线路侧的流经电流; $I_{G,m}$ 为单相光伏的注入电流。

大量的户用光伏无序接入改变了原各相电流的平衡状态,进而导致附加损耗发生变化。因此当三相不平衡影响低压配电网时,含光伏并网的各相电流相量为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = I_{av}(1 + \beta_a) \angle \varphi_a \\ \dot{I}_b = I_{av}(1 + \beta_b) \angle \varphi_b \\ \dot{I}_c = I_{av}(1 + \beta_c) \angle \varphi_c \end{cases} \quad (11)$$

式中, β_a 、 β_b 、 β_c 为各相电流的不平衡度, $\beta_m = (I_m - I_{av})/I_{av} \times 100\%$; I_{av} 为三相电流有效值的平均值; $\angle \varphi_a$ 、 $\angle \varphi_b$ 、 $\angle \varphi_c$ 为各相电流的相角。

当三相负荷总量一定时,根据各相负荷与平均负荷的相对关系,低压配电网三相不平衡的负荷情况可分为一相重载两相轻载、一相轻载两相重载以及一相重载一相平均负载一相轻载。按照单相不平衡度 β_m 定义可分为,当 β_m 处于 $[-1, 0]$ 时,该相负荷处于相对轻载状态;当 β_m 处于 $[0, 2]$ 时,该相负荷处于相对重载状态;当 β_m 等于0时,该相负荷处于平均负载状态。

以a相为例,当户用光伏接入a相时,该相不平衡度与光伏接入后的三相电流平均为

$$\begin{cases} \beta_a = \frac{(I_{GU,a} - I_{G,a}) - I'_{av}}{I'_{av}} \times 100\% \\ I'_{av} = I_{av0} - I_{pv0} = \frac{\sum_{m=a,b,c} (I_{GU,m} - I_{G,m})}{3} \end{cases} \quad (12)$$

根据用户侧负荷工况与户用光伏并网要求,假

定用户侧与光伏功率因数近似为1。当户用光伏仅接入a相时,结合式(12),a相的不平衡度可由负荷及光伏功率表示为

$$\beta_a = \frac{(I_{GU,a} - I_{G,a}) - I'_{av}}{I'_{av}} \times 100\% = \frac{-2I_{G,a} + 3I_{GU,a} - \sum_{m=a,b,c} I_{GU,m}}{\sum_{m=a,b,c} I_{GU,m} - I_{G,a}} \times 100\% = \frac{-2P_{G,a} + 3P_{GU,a} - \sum_{m=a,b,c} P_{GU,m}}{\sum_{m=a,b,c} P_{GU,m} - P_{G,a}} \times 100\% \quad (13)$$

由式(13)可知,当户用光伏接入时,根据a相的负荷情况可分为轻载、重载以及平均负载,且a相的不平衡度与各相的负荷消耗功率以及户用光伏的输出功率有关。当单相处于轻载时,由于户用光伏的过度补偿而导致该相不平衡度持续增高,导致三相不平衡问题进一步加剧;当单相处于平均负载时,户用光伏的接入导致该相的等效负载减小,三相不平衡度下降,直至户用光伏的过度补偿而持续增高;当单相处于重载时,户用光伏接入后所产生的有功功率可导致该相的不平衡度下降至零,使得三相不平衡情况有所改善。

1) 光伏接入的三相线路附加损耗分析。

以a相为例,当单相光伏接入低压配电网时,单相的线路损耗因该相电流幅值及相角发生改变而受到影响,单相线路损耗为

$$P_{a,ine} = I_a^2 R_{TG} = (1 + \beta_a)^2 I'_{av}{}^2 R_{TG} \quad (14)$$

当三相不平衡时,三相配电线路附加损耗为

$$\Delta P_{lines} = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) R_{TG} = I'_{av}{}^2 \sum_{m=a,b,c} (1 + \beta_m)^2 R_{TG} \quad (15)$$

2) 光伏接入的中性线附加损耗分析。

当三相平衡时,三相四线制的低压配电网中性线上未流经电流,因此中性线的附加损耗则为零;当三相不平衡时,中性线电流为

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = I_{av} \sum_{m=a,b,c} (1 + \beta_m)(\cos \varphi_m + j \sin \varphi_m) \quad (16)$$

因三相不平衡而导致的中性线上附加损耗为

$$\Delta P_n = I_n^2 R_n = I'_{av}{}^2 R_n \left[\sum_{m=a,b,c} (1 + \beta_m)(\cos \varphi_m + j \sin \varphi_m) \right]^2 \quad (17)$$

式中, $\cos \varphi_m$ 、 $\sin \varphi_m$ 为各相角的余弦值、正弦值; R_n 为中性线的基波电阻。

综上所述,计及三相不平衡扰动的低压配电网

配电线路总附加损耗为

$$\Delta P_{Lu} = \Delta P_{lines} + \Delta P_n = I'_{av}{}^2 \sum_{m=a,b,c} \left[(1 + \beta_m^2)(1 + \lambda e^{j2\varphi}) \right] R_{TG} \quad (18)$$

2.2 计及谐波畸变的有源配电网损耗分析

在低压配电网中,大量的冲击性、非线性负荷接入易产生严重的谐波畸变问题,所导致的谐波附加损耗不容忽视。另外,随着谐波次数的提升,低压配电网的线路集肤效应逐渐凸显,谐波扰动下的第 h 次谐波阻抗^[15-16]为

$$Z(h) = \sqrt{h} (R_{TG} + jX_{TG}) = R_{TG,h} + jX_{TG,h} \quad (19)$$

式中, R_{TG} 为配电线路的基波电阻; X_{TG} 为配电线路的基波电抗; \sqrt{h} 为第 h 次谐波阻抗的修正系数。

单相光伏并网系统逆变器由于采用PWM调制技术以及电力电子器件存在死区问题等,会产生谐波电压以及谐波注入电流,建立单相光伏并网的等值电路模型如图3所示。

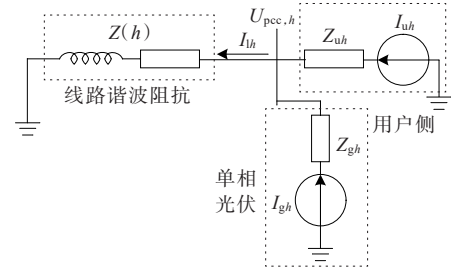


图3 单相光伏并网的等值电路模型

Figure 3 Equivalent circuit model for single-phase photovoltaic grid connection

由图3可知,单相光伏接入后的并网点谐波电压 $U_{pcc,h}$ 、注入线路谐波电流 I_{lh} 为

$$\begin{cases} U_{pcc,h} = Z_{uh} I_{uh} + Z_{gh} I_{gh} \\ I_{lh} = I_{uh} + I_{gh} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $U_{pcc,h}$ 为单相光伏并网点的第 h 次谐波电压; Z_{gh} 、 Z_{uh} 分别为单相光伏、用户侧的第 h 次等效谐波阻抗; $Z(h)$ 为线路第 h 次等效谐波阻抗; I_{gh} 、 I_{uh} 、 I_{lh} 分别为单相光伏、用户侧以及流入配电线路的第 h 次谐波电流。

根据单相光伏的工作特性,由单相光伏产生的注入基波电流、第 h 次谐波电流为

$$\begin{cases} I_{g1} = \left| \frac{P_G}{U_{pcc}} \right| \\ I_{gh} = H_h I_{g1} \end{cases} \quad (21)$$

联立式(20)、(21)可得,单相光伏接入后单次谐波含有率与总谐波畸变率分别为

$$H_{Gh} = \left| \frac{I_{gh}}{I_{l1}} \right| \times 100\% = \left| \frac{I_{uh} + I_{gh}}{I_{u1} + I_{g1}} \right| \times 100\% \quad (22)$$

$$T_G = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{gh}^2} / I_{l1} \times 100\% = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_{uh} + I_{gh}) / (I_{u1} + I_{g1})} \times 100\% \quad (23)$$

当用户侧接入非线性单相光伏之后,流入配电线路的谐波电流增大,即单次谐波含有率与总谐波畸变率上升,系统谐波的畸变程度进一步增大,根据叠加定理可知,谐波畸变下的三相配电线路附加损耗为

$$\Delta P_L = P_L - 3I_1^2 R_{TG} = 3 \sum_{h=2}^{\infty} H_{Gh}^2 I_{l1}^2 \sqrt{h} R_{TG} \quad (24)$$

2.3 计及电压偏差的有源配电网损耗分析

系统电压在传统配电网中沿功率潮流方向下降致使末端电压低于额定电压,分布式光伏接入则会影响功率潮流分布,甚至会产生功率潮流反向,进而出现末端电压抬升高于额定电压的情况,改变原电压偏差情况,最终导致配电网附加损耗的变化^[17-18]。建立含户用光伏的低压配电网等效模型如图4所示。

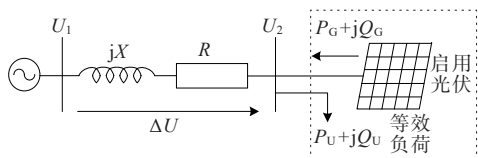


图4 含户用光伏低压配电网的简化等效

Figure 4 Simplified equivalent diagram of household photovoltaic low-voltage distribution network

当低压配电网未接入户用光伏时,可得到配电线路电压相量关系为

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \left(\frac{PR + QX}{U_1} + j \frac{PX - QR}{U_1} \right) \quad (25)$$

假设 $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$, 式(25)虚部可忽略不计,当户用光伏接入低压配电网前后,线路压降分别为

$$\Delta U = \frac{P_L R + Q_L X}{U} \quad (26)$$

$$\Delta U' = \frac{(P_L - P_G)R + (Q_L - Q_G)X}{U} =$$

$$\Delta U - \frac{P_G R + Q_G X}{U} = \Delta U - \Delta U_G \quad (27)$$

以a相的配电线路为例,忽略电压偏差,额定电压下的单相线路损耗为

$$P_{LN} = \frac{P_a^2 + Q_a^2}{U_n^2} R_{TG} = \frac{S_a^2}{U_n^2} R_{TG} \quad (28)$$

在实际的低压配电网中,负荷的实际功率变动通常会波及末端电压的变化,以a相为例,由电压偏差产生的单相配电线路损耗如下所示:

$$\Delta P_{Ld} = \frac{P_{Ua}^2 + Q_{Ua}^2}{U_n^2 (1 + \sigma_a)^2} R_{TG} - \frac{S_{Ua}^2}{U_n^2} R_{TG} = \left[\frac{1}{(1 + \sigma_a)^2} - 1 \right] \frac{S_{Ua}^2}{U_n^2} R_{TG} \quad (29)$$

式中, U_a 为a相线路的实际运行相电压; U_n 为单相线路的额定相电压; σ_a 为a相线路末端用户侧的电压偏差百分比; P_{Ua} 、 Q_{Ua} 以及 S_{Ua} 分别为a相线路末端用户侧负荷的实际有功功率、无功功率以及视在功率。

结合式(28)、(29),可得电压偏差产生的单相配电线路附加损耗为

$$\Delta P_{Ld} = \frac{P_{Ua}^2 + Q_{Ua}^2}{U_n^2 (1 + \sigma_a)^2} R_{TG} - \frac{S_{Ua}^2}{U_n^2} R_{TG} = \left[\frac{1}{(1 + \sigma_a)^2} - 1 \right] \frac{S_{Ua}^2}{U_n^2} R_{TG} \quad (30)$$

由此推导三相电压偏差导致的附加损耗为

$$\Delta P_{Ld} = \sum_{m=a,b,c} \left[\frac{1}{(1 + \sigma_m)^2} - 1 \right] \frac{S_m^2}{U_n^2} R_{TG} \quad (31)$$

3 复合电能质量扰动附加损耗分析

在实际运行过程中,含光伏接入的低压配电网通常会受到复合电能质量问题的扰动,总附加损耗是不同复杂程度的电能质量问题耦合扰动的结果。为建立三相四线制下的有源配电网线路总附加损耗模型,引入谐波畸变因子的定义,可将由各相电流所产生的附加损耗分为基波与谐波损耗。谐波畸变因子为

$$\epsilon_{mh} = \frac{I_{mh} - I_{avh}}{I_{avh}} \times 100\% \quad (32)$$

有源配电网配电线路的附加损耗可分为相线与中性线的附加损耗,结合式(28)、(32),在复合电能质量扰动下光伏接入的三相四线制配电线路总损耗为

$$P_{L.com} = (\epsilon_{a1}^2 + \epsilon_{b1}^2 + \epsilon_{c1}^2 + 3) I_{av1}^2 R_{TG} + \sum_{h=2}^{\infty} (\epsilon_{ah}^2 + \epsilon_{bh}^2 + \epsilon_{ch}^2 + 3) I_{avh}^2 R_{TGh} + \sum_{h=2}^{\infty} (m_h^2 + n_h^2) I_{avh}^2 R_{nh} + (m_1^2 + n_1^2) I_{av1}^2 R_n \quad (33)$$

其中, $m_h = (1 + \epsilon_{ah}) \cos \varphi_{ah} + (1 + \epsilon_{bh}) \cos \varphi_{bh} + (1 + \epsilon_{ch}) \cos \varphi_{ch}$, $n_h = (1 + \epsilon_{ah}) \cos \varphi_{ah} + (1 + \epsilon_{bh}) \cos \varphi_{bh} + (1 + \epsilon_{ch}) \cos \varphi_{ch}$ 。

由式(33)可知,配电网在复合电能质量扰动下的附加损耗为

$$\Delta P_{L.com} = (\epsilon_{a1}^2 + \epsilon_{b1}^2 + \epsilon_{c1}^2) I_{av1}^2 R_{TG} + \sum_{h=2}^{\infty} (\epsilon_{ah}^2 + \epsilon_{bh}^2 + \epsilon_{ch}^2 + 3) I_{avh}^2 R_{TGh} + \sum_{h=2}^{\infty} (m_h^2 + n_h^2) I_{avh}^2 R_{nh} + (m_1^2 + n_1^2) I_{av1}^2 R_n \quad (34)$$

根据式(33)、(34),定义损耗增量比来研究电能质量的表征指标与低压配电网各类型附加损耗的量化关系为

$$\eta = \frac{\Delta P_{L.com}}{P_{L.com}} \times 100\% \quad (35)$$

4 算例分析

在实际情况下,低压配电网的单一台区配电网线路传输距离、电力用户地理位置通常相距较近,同一地区的光照、温度等实际情况较为接近。因此单节点户用光伏的典型日出力功率相同,户用光伏出力曲线如图5中的实线所示,在低压配电网的对称运行工况下,户用光伏接入下各相序负荷曲线如图5中的虚线所示,具体户用光伏的规格参数如表1所示。

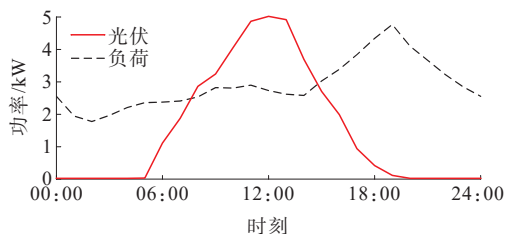


图5 典型日功率曲线

Figure 5 Typical daily power curve

表1 户用光伏规格参数

Table 1 Household photovoltaic specification parameters

功率容量/kW	电压等级/V	接入相数	最大效率/%
5.04	400	单相接入	99.2

4.1 典型电能质量问题对低压配电网附加损耗的影响分析

4.1.1 三相不平衡对附加损耗的影响分析

在不考虑低压配电网的谐波畸变与电压偏差的电能质量问题情况下,仅聚焦于分析有源低压配

电网中三相不平衡对配电网总附加损耗的量化关系。假设三相四线制的a、b、c三相的典型日负荷功率曲线如图6所示。因此,在无光伏接入背景下三相不平衡问题引起的三相损耗如图7所示。

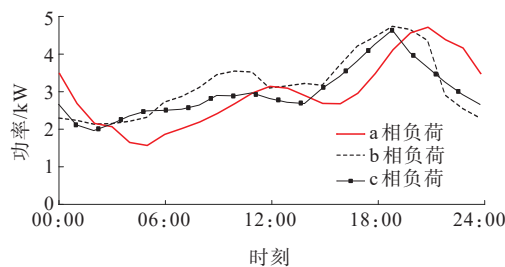


图6 a、b、c三相的典型日负荷功率曲线

Figure 6 Typical daily load power curve for three-phase a, b, and c

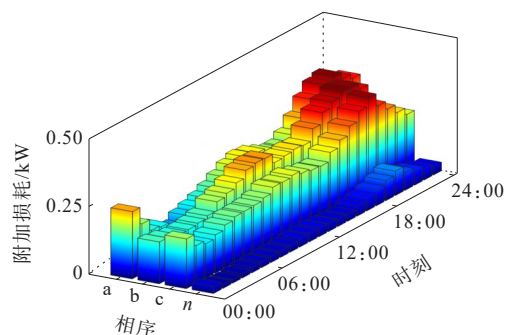


图7 无光伏接入背景下的三相损耗仿真结果

Figure 7 Simulation results of three-phase losses without photovoltaic integration

根据光伏的有效出力功率时间分布情况,选取09:00到15:00的三相负荷分布曲线,计算该时间段的三相最大不平衡度如图8所示,选择该时间区域内的三相不平衡度作为典型工况进行研究,分别对单相光伏接入此刻的a、b、c三相用户侧仿真分析。光伏接入不同负荷率下的三相不平衡引起各相总损耗如图9所示。

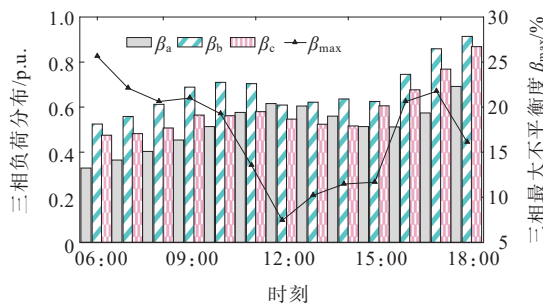


图8 长时间尺度的三相不平衡度分布

Figure 8 Distribution diagram of three-phase unbalance degree on long time scale

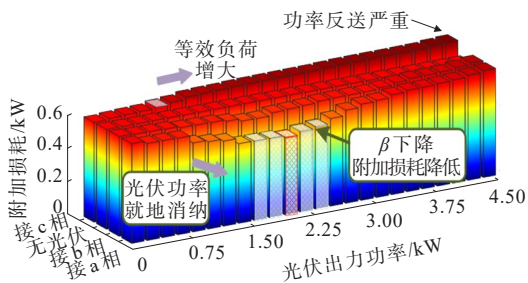


图 9 不同相序接入后的三相不平衡各相总损耗
 Figure 9 The total unbalance loss of each phase after different phase connection

由图 9 可知,对比有无单相光伏接入,三相不平衡总附加损耗呈下降趋势,尤其当单相光伏接入 a 相时,由三相不平衡引起的附加损耗增量比下降显著。证明单相光伏接入后对于由三相不平衡引起的附加损耗具有一定的治理作用。

根据综合上述仿真结果,可以得出结论:三相不平衡度的变化规律与之前推导的理论分析结果基本一致,三相不平衡损耗的变化规律与之前的理论推导结论基本吻合,在仿真层面验证了对分布式电源对三相不平衡影响的理论分析的准确性。

4.1.2 谐波畸变对附加损耗的影响分析

在不考虑低压配电网的三相不平衡与电压偏差的电能质量问题情况下,仅考虑有源低压配电网谐波对配电网总附加损耗的量化关系。

为验证单相光伏接入背景下的谐波畸变附加损耗影响作用,分别对单相光伏接入任一相情况仿真分析,单相光伏接入下谐波畸变导致的附加损耗仿真结果如图 10 所示。

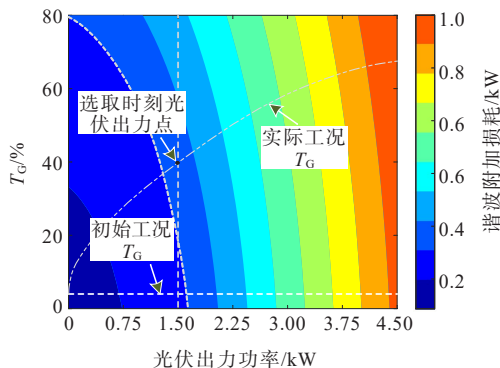


图 10 光伏出力与谐波畸变率、谐波附加损耗量化关系
 Figure 10 Quantitative relationship diagram between photovoltaic output, harmonic distortion rate, and harmonic additional loss

可知,单相光伏系统的接入可能会改变原有系统的谐波情况,从而影响总谐波畸变程度。由于光

伏系统自身的电源非线性,通过并入单相,当出力功率增大时,容易加剧系统中的谐波畸变程度,进而增大由谐波畸变引起的总附加损耗。

根据综合上述仿真结果,可以得出结论:谐波畸变导致的总损耗变化规律与谐波的次数以及畸变率具有密切联系,且在光伏接入背景下的谐波畸变损耗的变化规律与前文的理论推导结果较为接近,通过仿真验证了对单相光伏与谐波畸变损耗的关联性分析结果。

4.1.3 电压质量对附加损耗的影响分析

在不考虑低压配电网的三相不平衡与谐波畸变的电能质量问题下,仅考虑有源低压配电网电压偏差对配电网总附加损耗的量化关系。因此假设三相四线制的 a、b、c 三相的典型日负荷单相电压偏差情况如图 11 所示。

为验证单相光伏接入背景下的电压偏差附加损耗影响作用,首先对单相光伏接入任一相情况仿真分析,单相光伏接入后的电压偏差变化与接入单相光伏前后由电压偏差问题引起的总附加损耗分别如图 12、13 所示。

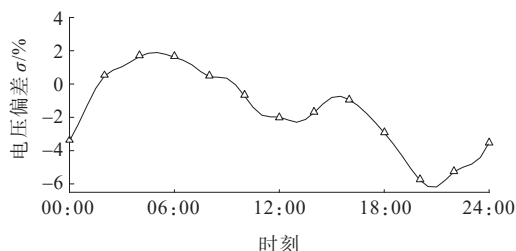


图 11 典型日单相电压偏差百分比变化曲线
 Figure 11 Typical daily single-phase voltage deviation percentage change curve

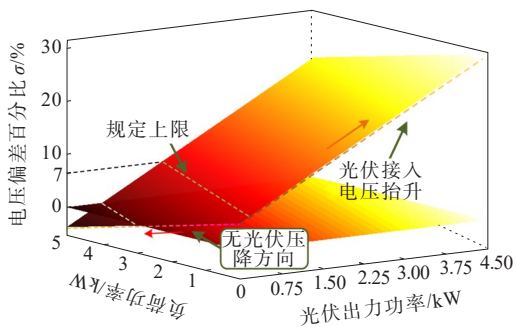


图 12 单相光伏接入下的电压偏差变化
 Figure 12 Voltage deviation variation diagram under single-phase photovoltaic connection

光伏电流注入该相后,相当于向低压配电网注入额外的有功功率。随着光伏有功功率的增加,其末端并网点电压会发生一定程度的抬升,因此单相

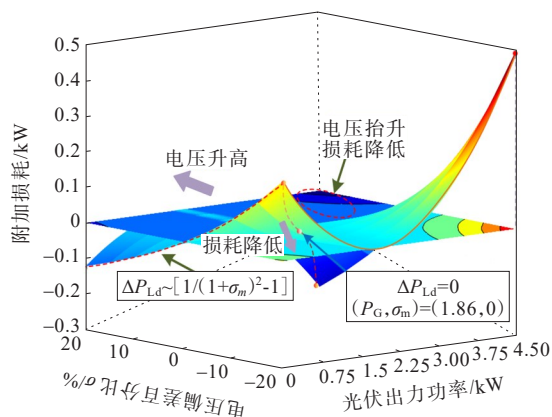


图13 电压偏差附加总损耗变化曲面

Figure 13 Curved surface of additional total loss variation due to voltage deviation

光伏会影响到线路的电压情况。当末端用户侧负荷处于欠电压状态时,一定容量的光伏功率输入有利于改善低压配电网中电压偏差情况;而当光伏输出功率超过所需容量时,会导致末端电压过高,进而使得单相的总附加损耗骤增。

根据综合上述仿真结果,可以得出结论:将单相光伏并入任意一相后,结合输出的光伏功率与用户侧负荷的关系,当用户侧原处于欠电压状态时会导致原有由电压偏差引起的总附加损耗减小,并且整体电能质量有所改善。且在光伏接入背景下的电压偏差损耗的动态特征与对应理论推导结果基本吻合,通过仿真验证了对单相光伏与电压偏差附加损耗的影响机理。

4.2 复合电能质量问题对低压配电网附加损耗的影响分析

根据图13可知,在实际的传统配电网中,通常电压偏差所产生的附加损耗随着电压由欠电压至正常电压的抬升趋势而逐渐改善降低。通常低压配电网的电压偏差率约为 $-10\% \sim 7\%$ ^[19-20],因此在不考虑低压配电网的电压偏差的电能质量问题情况下,仅聚焦于分析低压配电网中三相不平衡与谐波畸变的叠加作用对配电网总附加损耗的量化关系。

在传统配电网中,基于上述研究,由三相不平衡与谐波畸变的叠加作用与附加损耗的量化关系如图14所示。为验证单相光伏接入低压配电网对三相不平衡与谐波畸变的叠加作用所产生附加损耗的影响特征,以不同时刻所对应的光伏出力功率接入后的总损耗如图15所示。可知,光伏在不同时刻的出力功率与由复合电能质量问题引起的附加损耗紧密相关。

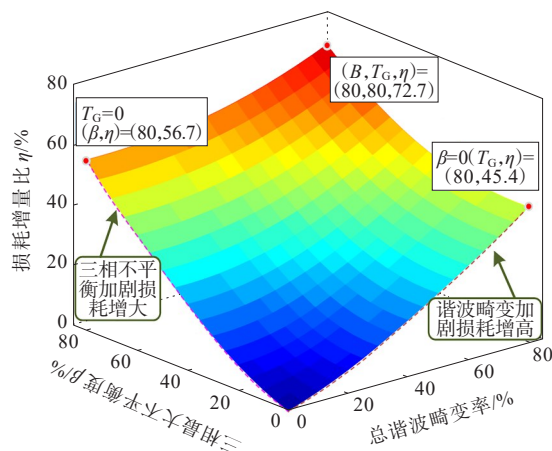


图14 三相不平衡与谐波畸变的叠加作用与附加损耗的量化关系

Figure 14 The quantitative relationship diagram of the superimposed effects of three-phase unbalance and harmonic distortion on additional losses

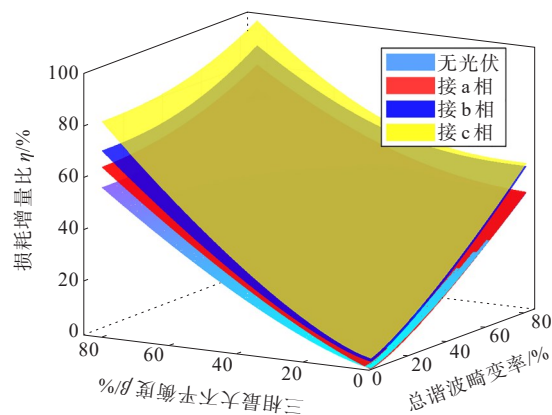


图15 复合电能质量问题叠加作用的总损耗变化曲面

Figure 15 The total loss variation surface graph of the superposition effect of composite power quality problems

5 结语

本文研究单相光伏接入对低压配电网线路附加损耗的影响机理,建立了含单相光伏的单一及复合电能质量问题附加损耗模型,并模拟了典型日下的长时间尺度接入单相光伏的总附加损耗演变特征。通过算例分析得到如下结论。

1) 由三相不平衡引起的附加损耗与单相光伏接入的容量及相序有关。单相光伏接入负荷重载相序时,能够降低最大三相不平衡度,附加损耗变化呈现下降趋势,而接入负荷轻载的相序则会导致最大三相不平衡度和附加损耗的增加。

2) 由于并网系统逆变器调制技术等影响,产生

的光伏电流会变相注入谐波电流,进而导致附加损耗的变化,由谐波畸变产生的附加损耗与光伏接入总谐波畸变率呈正相关。

3) 当用户侧电压处于欠电压时,光伏注入功率可以抬升用户侧电压,进而降低附加损耗,改善电压偏差;当处于过电压时,光伏的注入功率导致原电压偏差更加严重,同时附加损耗持续增高。

参考文献:

- [1] 董坤,赵剑锋,孙睿晨,等.含新型负荷元件的电力负荷建模方法研究现状与展望[J].电力系统自动化,2023,47(23):70-83.
DONG Kun, ZHAO Jianfeng, SUN Ruichen, et al. Research status and prospects of modeling methods for power loads with new load elements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23):70-83.
- [2] 钟浩,舒栋,张磊,等.考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型[J].电力系统保护与控制,2023,51(23):16-25.
ZHONG Hao, SHU Dong, ZHANG Lei, et al. A two-layer optimization model of value-added service in a distribution network considering power quality[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23):16-25.
- [3] 尹忠东,张静.复合电能质量扰动下配电网关键设备附加损耗的研究[J].电气应用,2019,38(3):12-20.
YIN Zhongdong, ZHANG Jing. Study on additional loss of key equipment in distribution network under complex power quality disturbance[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(3):12-20.
- [4] ALQUTHAMI T, RAVINDRA H, FARUQUE M O, et al. Study of photovoltaic integration impact on system stability using custom model of PV arrays integrated with PSS/E[C]//North American Power Symposium. Arlington, USA: IEEE, 2010:1-8.
- [5] 陈灵,黄兴华,张功林,等.考虑削峰填谷的分布式电源集群协同控制方法[J].智慧电力,2023,51(4):8-15.
CHEN Ling, HUANG Xinghua, ZHANG Gonglin, et al. Distributed generations clusters collaborative control method considering peak load shifting[J]. Smart Power, 2023, 51(4):8-15.
- [6] 张尔佳,余墨多,黄文焘,等.谐波电流注入式微电网主动保护方法[J].电力系统自动化,2023,47(23):172-179.
ZHANG Erjia, YU Moduo, HUANG Wentao, et al. Active protection method for microgrids based on harmonic current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23):172-179.
- [7] 周荔丹,许健,姚钢,等.船舶综合能源管理系统研究综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):171-186.
ZHOU Lidan, XU Jian, YAO Gang, et al. Review of integrated energy management systems for a marine microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13):171-186.
- [8] 路怡.含光伏电源配电网的无功优化研究[D].杭州:浙江大学,2021.
LU Yi. Research on reactive power optimization of the distribution network with photovoltaic power sources[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [9] 侯永全,张勇,袁朋生.低压分布式光伏并网对配电网网损的影响研究[J].能源与节能,2023(5):47-50.
HOU Yongquan, ZHANG Yong, YUAN Pengsheng. Influence of low-voltage distributed photovoltaic grid connection on distribution network loss[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(5):47-50.
- [10] 魏超峰,李琼林,蒋建东,等.计及谐波因素的配电网损耗量化计算与建模仿真[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(1):53-58+66.
WEI Chaofeng, LI Qionglin, JIANG Jiandong, et al. Quantification calculation and modeling simulation of distribution network losses considering harmonic factor [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(1):53-58+66.
- [11] 李琼林,刘书铭,温佳静,等.计及电能质量影响的10 kV配电网损耗计算模型及其实验验证[J].电力自动化设备,2022,42(1):212-220.
LI Qionglin, LIU Shuming, WEN Jiaping, et al. Calculation model of 10 kV distribution network loss considering power quality impact and its experimental verification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1):212-220.
- [12] 王二威,秦亮,皇甫成,等.基于空间分布和时序特征的配电网台区三相不平衡调整方法[J].电力系统自动化,2023,47(19):97-105.
WANG Erwei, QIN Liang, HUANGFU Cheng, et al. Three-phase unbalance adjustment method for distribution station areas based on spatial distribution and time-series characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19):97-105.
- [13] 魏杏,阮绍炯,曾小兰,等.分布式光伏接入对配电网电压质量的影响分析[J].电气开关,2023,61(3):94-97+102.
WEI Xing, RUAN Shaojiong, ZENG Xiaolan, et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic access on voltage quality of the distribution network[J]. Electric Switchgear, 2023, 61(3):94-97+102.
- [14] 王倍倍,蒋建东.计及复合电能质量的配电网附加损耗量化计算与建模仿真[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(4):52-59.
WANG Beibe, JIANG Jiandong. Quantitative calculation and modeling simulation of additional loss in

- distribution network considering composite power quality[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*,2022,43(4):52-59.
- [15] YIN Z D,ZHANG J,DONG Y X.Decoupling analysis of additional loss of key equipment in low voltage distribution network under complex power disturbance [C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018:1-6.
- [16] 伊慧娟. 基于最优特征集与改进 KELM 的复合电能质量扰动辨识[D]. 长沙:湖南大学,2021.
YI Huijuan. Identification of compound power quality disturbance based on optimal feature set and improved kernel extreme learning machine[D]. Changsha: Hunan University,2021.
- [17] 韦钢,陈森环,蔡阳,等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. *电力自动化设备*,2010,30(2):59-63.
WEI Gang, CHEN Senhuan, CAI Yang, et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2010,30(2):59-63.
- [18] ZHENG X Y,WU M,JI Y,et al.Research on influence of distributed generation on distribution network loss and evaluation method[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing,China.IEEE,2017:1-6.
- [19] 柴乐园,刘一欣,王成山,等. 含不完全量测的分布式光伏发电集群电压协调控制[J]. *中国电机工程学报*,2019,39(8):2202-2212+3.
CHAI Yuanyuan, LIU Yixin, WANG Chengshan, et al. Coordinated voltage control for distributed PVs clusters with incomplete measurements[J]. *Proceedings of the CSEE*,2019,39(8):2202-2212+3.
- [20] 梁志峰,夏俊荣,孙檬檬,等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究[J]. *电网技术*,2020,44(7):2430-2439.
LIANG Zhifeng, XIA Junrong, SUN Mengmeng, et al. Data driven assessment of distributed photovoltaic hosting capacity in distribution network[J]. *Power System Technology*,2020,44(7):2430-2439.
-
- (上接第 176 页 Continued from page 176)
- [22] OBRADOVIĆ D, DIJOKAS M, MISYRIS G S, et al. Frequency dynamics of the northern European AC/DC power system: a look-ahead study[C]//2023 IEEE Belgrade PowerTech.Belgrade,Serbia.IEEE,2023:1.
- [23] 牟澎涛,赵冬梅,王嘉成. 高渗透率风电接入对区域电网小信号稳定性的影响[J]. *电力系统自动化*,2016,40(11):137-142.
MU Pengtao,ZHAO Dongmei,WANG Jiacheng. Impact of high penetration wind power integration on small signal stability of regional power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2016,40(11):137-142.
- [24] 李军军,李圣清,匡洪海. 双馈风电系统参与频率调节的小扰动稳定性分析[J]. *电机与控制学报*,2012,16(8):1-10.
LI Junjun,LI Shengqing,KUANG Honghai. Small signal stability analysis of doubly-fed wind power system participated in frequency regulation[J]. *Electric Machines and Control*,2012,16(8):1-10.
- [25] 张明理,徐建源,李佳珏. 含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J]. *电网技术*,2013,37(3):740-745.
ZHANG Mingli, XU Jianyuan, LI Jiajue. Research on transient stability of sending power grid containing high proportion of wind power[J]. *Power System Technology*, 2013,37(3):740-745.
- [26] 朱莉. 风电场并网技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.
ZHU Li. The technology of interconnecting wind farm with power grid[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2011.
- [27] 张旭,查效兵,岳帅. 基于转子动能控制的DFIG调频能力分析与调频方案[J]. *电力科学与技术学报*,2020,35(3):141-147.
ZHANG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai. Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly-fed induction generator based on the rotor kinetic energy control[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2020,35(3):141-147.