

针对新型电力系统失稳动态演化过程的同调网络重构策略

翁汉琍¹, 江毅², 林湘宁³, 魏繁荣³, 李振兴¹

(1. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网福州市长乐区供电公司, 福建 福州 350200;

3. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:新型电力系统中新能源的不确定性、非线性等特征影响了传统电力系统的失稳特性,导致现有失步解列策略难以精确实施。在明晰新能源功率变化对振荡中心迁移影响的基础上,提出一种同调区间重构策略。以解列后子系统的源荷平衡率及负荷损失比例为优化目标,利用潮流控制器的无功调节能力在一定范围内调节失步振荡中心的位置。重构后的解列断面减小了失稳状态下新能源设备脱网的可能性,同时兼顾了分割失步振荡中心所带来的良好同调性。PSCAD的仿真对比验证了所提策略的有效性。

关键词:新能源;失步解列;同调区间重构;失步振荡中心;负荷损失

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202411024

0 引言

随着我国能源发展战略的不断推进,各类可再生能源逐步替代现有的火力发电厂,为我国实现可持续发展的目标夯实了基础,并形成了我国高比例新能源与高比例电力电子设备的新型电力系统^[1-2]。然而,新能源的不确定性、电力电子设备的强非线性等特征从本质上改变了传统电力系统的运行特性,“致稳性”差、惯性低、抗扰性弱等问题也随之出现^[3-4]。

在上述背景下,连锁故障发生并引发失步振荡,最终使大停电事故的风险成倍增长^[5-7]。由于电力电子设备控制之间的耦合作用,连锁故障的阻断变得极为困难。同时,对电压、频率偏差的低耐受性使得电力电子设备容易脱网,造成源荷侧失衡加剧,进一步恶化了系统运行工况。而作为安全稳定运行的最后一道防线,失步解列具有重要作用^[8],但是运行特性的改变给系统带来了新的失稳特性,进而降低了现有失步解列策略的有效性。此外,在失步振荡期间,新能源的稳定并网运行也遇到极大的挑战^[9-10]。因此,如何精准实施解列控制,提高最后一道防线的可靠性,是保证电力系统安全稳定运行的重要问题。

现有的解列断面选择方法主要包含2类:一类是基于失步振荡中心的辨识,最终以失步振荡中心所在位置的支路集形成失步振荡的解列断面^[11-14];另一类是以有功功率平衡或功率冲击最小作为解列

断面搜索的目标,设计检索时的优选条件,通过各类算法求出最优解,将其作为最优解列断面的选择^[15-18]。2类方法各有优劣:基于失步振荡中心的解列断面能够保证解列后子系统内的同调性以及暂态能量小,有利于解列后子系统的恢复,但未考虑解列后子系统内部的功率平衡,容易造成较大的负荷损失;基于功率平衡搜索的最优断面能够保证解列后子系统内部的功率平衡以及负荷损失率最小,但子系统内部同调性差,对系统的稳定性有一定影响。由于系统扰动的随机性以及拓扑结构的复杂程度,在传统电网下2类方法的优劣难以兼得。

研究表明,新能源的动态特性能够影响失步振荡中心的位置。若能主动将失步振荡中心迁移到合适的位置进行解列,则有可能兼得上述2类方法的优势,同时避免失步振荡中心的低电压影响新能源及重要负荷的运行,这对于新型电力系统的安全稳定具有极为重要的意义。文献^[19-21]分别对不同类新能源并网后的失步振荡中心迁移进行研究,结果表明,新型电力系统失稳后,由于新能源控制模式差异较大以及非线性化强,失步振荡中心迁移范围扩大,系统的不确定性更强。上述文献在失步振荡的推演中采用推导外特性表达式的方式,得到单一新能源接入下失步振荡中心的迁移规律,但电力电子设备的非线性化导致外特性的推演求解困难,且控制策略的差异使该方法的普适性较差。此外,上述结果对于新能源并网导致系统失稳特性变化的物理意义不够清晰,主动迁移失步振荡中心的方案尚不具备可行性,亟需进行深入的理论研究。

随着柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)的发展,针对系统电压调节、功率调控的各类统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)得到广泛的实际应用,进一步提高

收稿日期:2023-12-29;修回日期:2024-05-06

在线出版日期:2024-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077120)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077120)

了对系统的精准调控能力^[22-23]。若能够有效利用UPFC,则不仅能够提高第三道防线的可靠性,还能够提高经济性以及电力系统的安全性。本文在新型电力系统的背景下,明晰新能源功率变化对系统失步振荡特性的影响,基于此,提出一种同调区间重构策略。该策略在失步振荡的过程中,以损失最小化为目标,利用UPFC的潮流调控能力,在一定范围内迁移失步振荡中心。重构后的解列断面减小了失稳状态下新能源设备脱网的可能性,提高了解列后子系统的源荷平衡程度,减少了负荷损失,同时兼顾了分离失步振荡中心所带来的良好同调性。最后,通过PSCAD仿真对比验证了本文所提策略的有效性。

1 新型电力系统失稳演化分析

关于传统电力系统失步特性的研究,通常将失步系统等效为2个同调机群,分析等效功角摆开期间电压、频率、相位等电气量的变化趋势^[24],因此,基于失步振荡中心识别的失步解列方法通常围绕相关电气量来制定。这类方法在传统电力系统中的可行性已经得到了充分的验证,然而在新型电力系统的背景下,新能源通常采用跟网型控制策略并网,新能源不参与系统电压、频率的构建,仅以电流源注入功率的形式参与电网运行,即新能源动态变化对失步振荡的影响无法直接体现在电压、频率、相位等电气量上,对这类电气量的分析无法直接体现其物理意义。

此外,传统电网中系统失稳导致功率变化,功率特征在非线性系统中也受到影响。虽然系统功率变化与失稳演化过程的耦合不如电压、频率等电气量紧密,但在新型电力系统中新能源的动态特性直接影响系统功率变化,因此,本章对新型电力系统的失稳特性进行分析,明晰新型电力系统失稳时的功率变化特征,将其作为通过UPFC主动迁移失步振荡中心的理论基础。

1.1 新能源故障穿越特性对失稳演化的影响

跟网型电源输出特性受并网点(point of common coupling, PCC)运行状态和控制目标的影响。稳态时,新能源运行在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下,当PCC电压幅值 U_s 在系统动态过程中发生变化时,新能源进入故障穿越运行模式,在规定工况下不脱网运行并提供无功支撑(响应时间为60 ms),采用锁相环(phase locked loop, PLL)来保持与电网的同步,并通过双环控制器解耦有功功率和无功功率的控制。新能源输出电流为:

$$I_f = I_p + I_Q \quad (1)$$

式中: I_f 为跟网型电源的输出电流; I_p 、 I_Q 分别为注入系统的有功和无功电流。

新能源故障穿越时的无功支撑方式为:

$$I_{Qref} = \begin{cases} k'(0.9 - U_s) & 0.2 \text{ p.u.} \leq U_s \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ k'(U_s - 1.1) & 1.1 \text{ p.u.} \leq U_s \leq 1.3 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{Qref} 为故障穿越时无功电流参考值; k' 为设置的下垂系数。

本节基于新能源故障穿越过程中的控制目标对系统失稳演化进行分析,将跟网型电源等效为注入有功功率与无功功率的并联电流源,在等值双机系统上进行分析。以图1为例,图中: i_{dc} 、 u_{dc} 分别为新能源输出的电流、电压; E_1 、 f_1 分别为送端系统的电势和频率; E_2 、 f_2 分别为受端系统的电势和频率; Z_1 、 Z_2 分别为送端系统和受端系统的内部阻抗; I_1 为送端系统流出电流; I 为线路流经电流; Z_L 为线路阻抗。

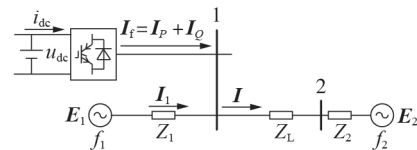


图1 含新能源的等值双机系统

Fig.1 Equivalent two-machine system with new energy

假设2个等效系统的频率满足 $f_1 > f_2$,各段阻抗角可能不同(通常阻抗角大于 70° 小于 90°),根据节点电压法,PCC的电压相量 U_s 为:

$$U_s = \frac{Z_2 + Z_L}{Z_\Sigma} E_1 + \frac{Z_1}{Z_\Sigma} E_2 + \frac{Z_1(Z_2 + Z_L)}{Z_\Sigma} I_f \quad (3)$$

式中: Z_Σ 为总阻抗。

同时令:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{Z_2 + Z_L}{Z_\Sigma} E_1 \\ K_2 = \frac{Z_1}{Z_\Sigma} E_2 \\ K_3 = \frac{Z_1(Z_2 + Z_L)}{Z_\Sigma} I_f \end{cases} \quad (4)$$

可以将 K_3 写为如下形式:

$$K_3 = \frac{Z_1(Z_2 + Z_L)}{Z_\Sigma} I_p + \frac{Z_1(Z_2 + Z_L)}{Z_\Sigma} I_Q \quad (5)$$

将式(5)等号右侧第一项定义为 K_p ,第二项定义为 K_Q ,由此可以得到它们的相量关系,如图2所示。图中: θ_1 为PCC电压相位; θ_{K1} 、 θ_{K2} 分别为 K_1 和 K_2 的相位; $\Delta\theta$ 为 K_1 和 K_2 的相位差。

K_p 和 K_Q 的幅值与相位受 U_s 的幅值与相位的影响,可以将 U_s 写为如下形式:

$$U_s = K_1 + K_2 + K_p + K_Q \quad (6)$$

系统功角摆开时,PCC电压相位增大,电压幅值减小。当系统间的等效功角差摆幅超过 180° 时,认为系统失去同步,等效功角差将在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内周期变

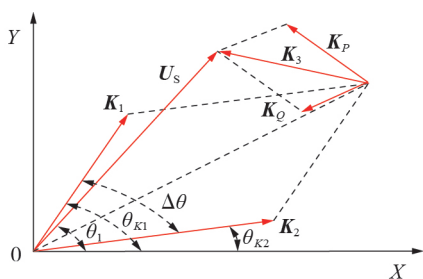


图2 PCC电压相位的关系

Fig.2 Phasor relationship of PCC voltages

化。此时,根据式(1)与式(2),新能源在MPPT模式与故障穿越模式间周期性切换。在MPPT模式下,跟网型电源的等效阻抗为 $-R$,忽略线路电阻,两侧发电机间的转移阻抗 Z'_s 为:

$$Z'_s = jX_s + \frac{X_1(X_2 + X_L)}{R} \quad (7)$$

式中: X_1 、 X_2 分别为系统送端、受端等效感抗; X_L 为线路感抗; X_s 为等效感抗之和。

在新能源接入的等值双机系统中,支路传输功率由送端发电机及跟网型电源提供。故障后支路的功角稳定性受跟网型电源输出有功功率的影响,当PCC电压较低时,受故障穿越控制影响,新能源有功输出忽略不计。根据式(7)可得到功角特性表达式为:

$$P_m = \frac{E_1 E_2}{X_s} \sin \delta + \left| \frac{E_1 - E_2}{Z'_s} \right|^2 \frac{X_1(X_2 + X_L)}{R} \quad (8)$$

式中: P_m 为线路传输的有功功率; E_1 、 E_2 分别为送端、受端系统的电势幅值; δ 为系统功角差。

传统电网的功角特性为式(8)等号右侧第一项。在两端功角摆开至 180° 的过程中,新能源从MPPT模式切换到故障穿越模式,当系统功角差趋于 180° 时,式(8)等号右侧第二项趋于0,功角特性与跟网型电源未接入时的相同。

结合上述分析可以得到对应支路的功角特性曲线,如图3所示。图中: δ'_0 、 δ_0 分别为新能源系统、传统系统的稳定平衡点功角差; δ_a 为故障切除点功角差; δ_b 为2个系统的不稳定平衡点功角差; P_0 为受端

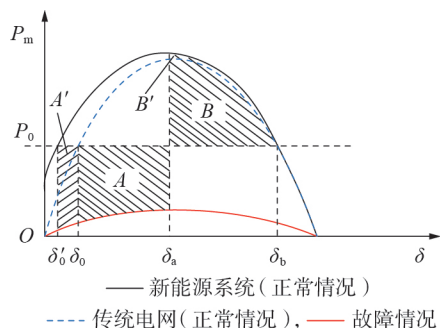


图3 支路功角特性曲线

Fig.3 Rotor angle characteristic curves of branch

负荷所需功率。根据等面积准则,故障清除前后的面积满足 $A+A' \leq B+B'$ 即可保证系统稳定。为避免系统失稳,要求故障切除的临界功角比传统电力系统的临界切除角更小,因此,在新型电力系统失稳演化的过程中,故障穿越控制的切换会加快系统失稳的进程,系统更容易发生失步振荡。

1.2 故障穿越对失步振荡中心迁移特性的影响

失步振荡期间电压跌落最严重的位置称为振荡中心,将其设为 M 点。当系统功角差等于 180° 时,振荡中心电压为0,称该点为失步振荡中心。此时有:

$$\begin{cases} E_1 = Z_1 I_1 + Z_{1M} (I_1 + I_f) \\ E_2 = -(Z_2 + Z_{2M}) (I_1 + I_f) \end{cases} \quad (9)$$

式中: Z_{1M} 、 Z_{2M} 分别为母线1、2到振荡中心的阻抗。

当出现失步振荡中心时,新能源处于故障穿越控制模式,为讨论新能源输出对系统的影响,可将 E_1 写为:

$$E_1 - Z_1 I_f = (Z_1 + Z_{1M}) (I_1 + I_f) \quad (10)$$

令失步振荡中心位置系数为 k_M ,满足:

$$k_M = \left| \frac{Z_2 + Z_{2M}}{Z_1 + Z_{1M}} \right| \left| \frac{E_1 - Z_1 I_f}{E_2} \right| \quad (11)$$

根据式(9)可知,失步振荡中心位置系数 $k_M=1$ 。可以将式(11)表示为:

$$k_M = k_Z k_E = \left| \frac{Z_2 + Z_{2M}}{Z_1 + Z_{1M}} \right| \left| \frac{E_1 - Z_1 I_Q}{E_2} \right| = 1 \quad (12)$$

$$Z_1 I_Q = |Z_1| |I_Q| \angle (\theta_{z1} + \theta_1 \pm 90^\circ) \approx \mp |Z_1| |I_Q| \angle \theta_1 \quad (13)$$

式中: k_Z 、 k_E 分别为阻抗比、电压比; θ_{z1} 为 Z_1 的阻抗角。

系统两端等效阻抗在系统总阻抗中较小,因此本节假设PCC的电压相位与 E_1 相位接近。综上,可进行失步振荡中心迁移特性分析。

当 $I_Q=0$ 时,失步振荡中心位置系数为:

$$k_M = \left| \frac{Z_2 + Z'_{2M}}{Z_1 + Z'_{1M}} \right| \frac{E_1}{E_2} = 1 \quad (14)$$

式中: Z'_{1M} 、 Z'_{2M} 分别为 $I_Q=0$ 时母线1、2到振荡中心的阻抗。此时,阻抗比为 k'_Z ,电压比为 k'_E 。当新能源处于故障穿越控制(如式(2)所示)时,式(13)中“ \pm 、 \mp ”取负值,满足:

$$\begin{cases} k_M = 1 \\ k_E > k'_E \\ k_Z < k'_Z \end{cases} \quad (15)$$

即:

$$\begin{cases} Z_{1M} > Z'_{1M} \\ Z_{2M} < Z'_{2M} \end{cases} \quad (16)$$

此时的失步振荡中心比跟网型电源未接入时的振荡中心更靠近受端发电机,且随着跟网型电源注入无功功率的增大向受端发电机处迁移。

同理可得,当随着跟网型电源吸收无功功率(双馈风机撬棒保护投入)时,失步振荡中心向PCC处迁移,且当跟网型电源注入或吸收的无功功率足够多时,可令:

$$\left| \frac{Z_2 + Z_L}{Z_1} \right| < k_z < \left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_L} \right| \quad (17)$$

此时,失步振荡中心将会迁移出母线1或母线2,随后主导振荡中心迁移的主要因素可能会发生变化,促使振荡中心继续迁移。

当两侧等效功角摆开到 180° 时,线路上只传输无功功率,因此,将式(12)中电压比的分子、分母同时乘以线路传输电流,将 k_M 用无功功率的形式表示为:

$$k_M = \left| \frac{Z_2 + Z_{2M}}{Z_1 + Z_{1M}} \right| \left| \frac{Q_{G1} + Q - Z_1 I_Q^2}{Q_{G2}} \right| = 1 \quad (18)$$

式中: Q 、 Q_{G1} 、 Q_{G2} 分别为新能源、送端、受端发出的无功功率。

无功功率与失步振荡中心的关系如图4所示。图中, Q_1 、 Q_2 为两侧母线传输的无功功率,以流出母线方向为正,流入母线方向为负。

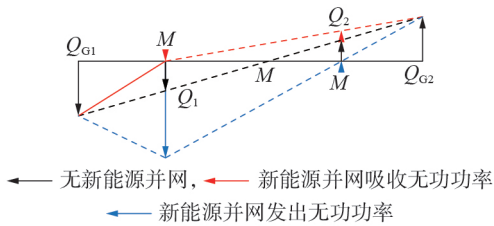


图4 无功功率与失步振荡中心的关系

Fig.4 Relationship between reactive power and out-of-step oscillation center

在不考虑新能源接入的情况下,当功角摆开到 180° 时,无功功率向线路内部传输,失步振荡中心处于该线路上。当新能源并网吸收无功功率时:若母线1上的无功输出为0,则失步振荡中心迁移至母线1处;若无功功率流向母线1,则失步振荡中心迁移出母线1。同理,可得新能源并网发出无功功率时失步振荡中心迁移的情况。基于上述分析可知,通过支路两侧无功功率流向可以判断失步振荡中心位置。

综上所述,在系统失步振荡的过程中,通过对新能源输出特性的调控合理地改变失步振荡中心的位置,以此协调解列后子系统的同调性及功率平衡性。然而,要精准把控失步振荡中心的迁移,高质量地完成同调区间重构,仍将面临诸多挑战。因此,本文将在新型电力系统背景下合理评估新能源的调节能力,在此基础上利用优化算法协调若干同调区间内的功率平衡程度,并指导调节新能源的输出特性,主动迁移失步振荡中心,完成精确的同调区域重构,有

效降低负荷损失。

2 新型电力系统同调区间重构策略

新型电力系统同调区间的重构主要面临以下3个问题:

- 1) 如何定位新型电力系统的失步振荡中心?
- 2) 如何选择新型电力系统重构解列断面?
- 3) 如何完成新型电力系统的同调区间重构?

本章主要针对这3个关键问题进行分析以及方案的制定。

2.1 新型电力系统失步振荡中心定位

根据第1章的分析,在新型电力系统的背景下,失步振荡中心的位置会受新能源动态特性的影响,由于跟网型电源的动态特性不直接反映于电压、频率等电气特征量上,这导致基于失步振荡中心辨识的解列策略精确度降低,因此,本节将对文献[12]中基于系统频率特性的失步解列方法进行改进。

当系统在功角差 $\delta < 70^\circ$ 发生同步振荡时,系统各处频率将在两端频率 f_1 、 f_2 之间变化,因此,系统内任意2处的频率差值均小于 $\Delta f_{ref} = f_2 - f_1$ 。而当系统在功角差 $\delta > 70^\circ$ 发生失步振荡时,系统内振荡中心的一侧频率会大于 f_2 ,另一侧频率会小于 f_1 ,此时存在频率差 $\Delta f > \Delta f_{ref}$,说明系统发生失步振荡,失步判断为:

$$\Delta f > \Delta f_{ref} \quad (\text{持续 } 30 \text{ ms}) \quad (19)$$

同时,利用失步振荡中心电压为0的特性确定其位置,但仅当功角差 $\delta = 180^\circ$ 时,存在失步振荡中心,因此,该方法无法准确反映及预测由新能源动态特性所引起的失步振荡中心迁移。

根据上文分析结果,可以通过两端无功功率流向振荡中心的情况确定失步振荡中心的位置,改进判断为:

$$\begin{cases} \Delta f > \Delta f_{ref} \quad (\text{持续 } 30 \text{ ms}) \\ Q_1 Q_2 \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

该方法通过频率特征预测系统的稳定状态,并通过无功功率特征确定失步振荡中心的位置,因此,在新型电力系统中,仅需在线路两端分别测量频率大小以及无功功率的方向,就能有效地评估支路的失稳状态以及相应的演化趋势。

2.2 解列断面优化方法

利用2.1节方法可在新型电力系统中精准定位失步振荡中心的位置,此时形成的失步解列断面虽然满足同调性的要求,但区间内的功率平衡程度较低,该断面并非是最优的解列位置,因此,本节考虑影响失步解列的主要因素,设计优化方法。

2.2.1 解列断面优化方法框架

由于调节失步振荡中心位置的过程是连续的,

只能从失步振荡中心所在的支路转移到相连的支路,同时,考虑到新能源输出在失步振荡过程中的波动以及UPFC的无功调节能力上限,并非所有支路上的失步振荡中心都能够满足迁移的条件,因此,最优解列断面无法通过算法计算1次求得最终结果。

综上所述,本文采用逐步优化的思路进行解列断面的寻优过程:以2.1节失稳预测得出的失步振荡中心所在的支路为最优解列断面的初始支路;搜索与初始支路相连的所有支路,根据优选条件进行计算,遍历求得这一步的最优结果;根据优化后的结果重新定位振荡中心,形成新的解列断面,并根据该结果重复上述步骤的计算,直至寻得最优解。

2.2.2 解列断面迁移优选条件

本文所提方法调节失步振荡中心至合适位置解列,解列后的分区已满足同调性的要求。同时,解列断面还需要满足以下优选条件。部分优选条件参考文献[22],本文根据实际需求增加了新的优选条件。

1) 功率平衡指数。

在解列后的孤岛系统中,功率平衡是影响系统恢复的主要因素。当孤岛中的系统负荷远大于系统出力时,需要进行切负荷的操作以维持系统功率平衡。因此,失步振荡中心的迁移要考虑功率平衡程度,孤岛集 $\{IS_k\}$ 中相对功率失衡比例 $P_{imb}^{IS_k}$ 的定义如式(21)所示。

$$P_{imb}^{IS_k} = \frac{\left| \sum P_k^{gen} - \sum P_k^{load} \right|}{\sum P_k^{gen}} \quad (21)$$

式中: P_k^{gen} 、 P_k^{load} 分别为孤岛 IS_k 中发电机发出的功率、负荷吸收的功率。

在失步振荡中心迁移后形成新的解列断面,重新计算相对功率失衡比例 $P_{imb}^{IS_k}$,定义前后相对功率失衡比例的差值为功率平衡指数 $K_{IS_k}^P$,即:

$$K_{IS_k}^P = P_{imb}^{IS_k} - P_{imb}^{IS_k'} \quad (22)$$

2) 电气距离指数。

为保证解列后的孤岛内部具有紧密的电气联系,从而提高解列后孤岛的稳定性,以等效阻抗定义支路的电气距离程度,节点 i 和节点 j 间支路的等效阻抗 Z_{ij}^{eq} 为:

$$Z_{ij}^{eq} = U_{ij} / I_{ij} \quad (23)$$

式中: U_{ij} 、 I_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 间支路的电压、电流。

将任意节点 i 与其余节点间的电气关联程度定义为电气耦合连接度 D_i ,表示为:

$$D_i = \frac{1}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_k} Z_{ij}^{eq}} \quad (24)$$

式中: N_k 为孤岛节点数。

基于此,定义重构同调分区与初始同调分区的电气耦合连接度均值之差为电气距离指数 $K_{IS_k}^D$,其表达式为:

$$K_{IS_k}^D = \frac{1}{N_k + 1} \sum_{i \in \{IS_k'\}} D_i - \frac{1}{N_k} \sum_{i \in \{IS_k\}} D_i \quad (25)$$

3) 无功调节指数。

由第1章可知,失步振荡中心的迁移受无功功率变化的影响,无功补偿越多,调节失步振荡中心的能力越强。在需要进行振荡中心迁移时,由调度中心发布指令,UPFC并联的静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)工作在定无功模式下,通过发出或者吸收无功功率调节失步振荡中心位置。

本文设置UPFC的最大无功出力不超过 $\pm Q_{UPFC}$,同时,考虑到新能源场站在失步振荡过程中的无功出力变化对失步振荡中心调节的助力或阻碍作用,设置新能源最大无功波动为装机容量 S_l^{new} 的30%。定义无功调节指数 $K_{IS_k}^Q$ 为:

$$K_{IS_k}^Q = \frac{Q_{UPFC} \pm 0.3 S_l^{new}}{S_{ij}^T} \quad (26)$$

式中: S_{ij}^T 为线路的传输容量。当失步振荡中心两侧母线未连接新能源场站时,认为其不提供无功补偿。

4) 安全裕度指数。

失步振荡中心所在位置附近的电压快速波动,对新能源并网运行以及重要负荷的维持造成极大影响,因此,考虑失步振荡中心附近是否存在新能源接入以及重要负荷供给,将其作为安全裕度评估的标准。

以失步振荡中心所在支路两侧是否存在新能源场站或重要负荷($N_{IS_k}^{Load}$)定义安全裕度指数 $K_{IS_k}^S$,其表达式为:

$$K_{IS_k}^S = \begin{cases} S_l / S_{max} & \{N_{IS_k}^{Load}\} \neq \emptyset \cap \{N_{IS_k'}^{Load}\} = \emptyset \\ -S_l / S_{max} & \{N_{IS_k}^{Load}\} = \emptyset \cap \{N_{IS_k'}^{Load}\} \neq \emptyset \\ 0 & \{N_{IS_k}^{Load}\} = \emptyset \cap \{N_{IS_k'}^{Load}\} = \emptyset \end{cases} \quad (27)$$

式中: S_l 为节点 l 新能源场站容量或重要负荷规模; S_{max} 为所有节点中最大的新能源场站容量或重要负荷规模。

可以定义综合指数 K_{IS_k} 为:

$$K_{IS_k} = K_{IS_k}^P + K_{IS_k}^D + K_{IS_k}^Q + K_{IS_k}^S \quad (28)$$

遍历所有与初始断面相连的支路,通过支路的排列组合计算每种情况下的综合指数,取最优值的支路组合作为迁移后的新断面。

当上述指数满足式(29)所示条件之一时,停止更新解列断面。

$$\begin{cases} K_{IS_i^*}^P + K_{IS_i^*}^D + K_{IS_i^*}^S \leq 0 \\ K_{IS_i^*}^Q \leq 0 \end{cases} \quad (29)$$

当所有断面均满足式(29)所示条件之一时,即完成解列断面的选优。

2.3 同调区间重构

在失步振荡过程中,利用无功补偿设备进行无功调节受到系统过电压/低电压的约束,因此,在实际的操作过程中,UFPC的无功功率输出/吸收允许范围需要调度人员进一步的评估。

基于上述振荡中心识别方法和解列断面优化算法可以构造完整的同调区间重构策略,其流程如附录A图A1所示,具体步骤如下:

- 1) 根据2.1节的方法预测系统失稳,确定失步振荡中心位置,以此作为解列断面的初始值;
- 2) 根据2.2节所提算法计算下一步失步振荡中心迁移的最优解;
- 3) 依据步骤2)解出的断面,通过调度中心发布控制指令改变UPFC的控制模式,使其提供或吸收无功功率,将失步振荡中心调节至新的位置;
- 4) 重复步骤1)~3),直至求得最优的解列断面,最后实施解列控制。

3 算例验证

3.1 失步振荡中心迁移验证

为验证本文对新型电力系统失稳演化机理特性分析推导的正确性,本节在含新能源的3机9节点系统上进行仿真。含新能源接入系统结构如附录B图B1所示。在该系统中,Bus₄接入容量为50 MW的风电场。设置在 $t=3$ s时线路2-4发生短路故障,故障持续时间为0.3 s,随后线路恢复连通。系统失稳全过程中的发电机转子转速如图5所示。 $t=3.34$ s时系统失稳, $t=4.28$ s失步振荡中心迁移,发电机G₂、G₃失去同步。

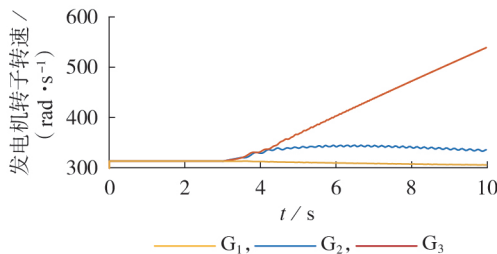


图5 3机9节点系统发电机转子转速
Fig.5 Generator rotor speed of 3-machine 9-bus system

检测发电机母线处的频率以及支路上的无功功率流向。通过2.1节的失步振荡预测方法可以准确预判系统失稳情况以及失步振荡中心位置。母线频

率差值和失步振荡中心判断结果分别如图6、7所示。图6中, Δf_{1-2} 表示母线1与母线2间的频率差, Δf_{1-3} 、 Δf_{2-3} 含义类似,取 $\Delta f_{ref} = \pm 1$ Hz。图7中,若无功功率满足式(20),则无功判据取值为1,否则取值为0,以此判断失步振荡中心所在支路。

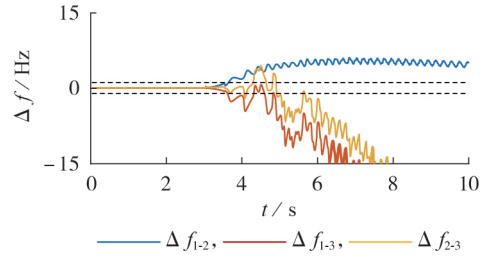


图6 母线频率差值
Fig.6 Bus frequency difference

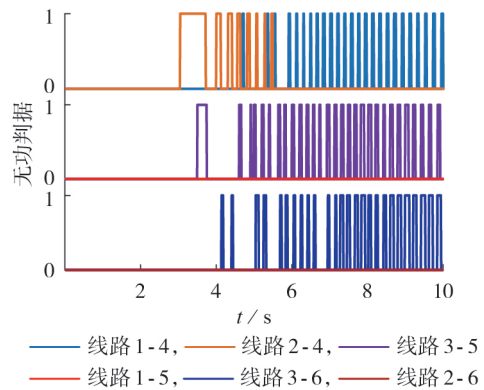


图7 失步振荡中心判断结果

Fig.7 Judgment results of out-of-step oscillation center

通过检测频率可以判断系统同调情况,图6中的判断结果与图5相符。可以得出,当 $t=3.34$ s开始失稳时,发电机G₂与G₃同调,失步振荡中心处于线路2-4与线路3-5上。经过一段时间的演化后,风电场无功出力下降,导致发电机G₁与G₂之间的失步振荡中心逐渐由线路2-4迁移到线路1-4,风电场无功出力(标幺值)如图8所示。同时,发电机G₂与G₃之间也发生失步振荡,失步振荡中心为线路3-6。

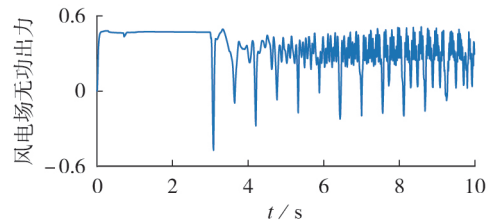


图8 风电场无功出力

Fig.8 Reactive power output of wind farm

综上所述,新能源的输出特性变化会影响失步振荡中心的位置,系统失稳特性的动态化愈发明显。该算例验证了本文机理分析的正确性,为后续策略

的实施奠定了良好的理论基础。

3.2 同调区间重构算例

本节在含新能源的10机39节点系统中验证所提同调区间重构方法的有效性及优越性。系统结构如附录C图C1所示,所有母线所接风电场容量均为100 MW。

在 $t=3$ s时,线路3-18发生短路故障,故障持续0.2 s后线路恢复连通。发电机转子转速如图9所示。

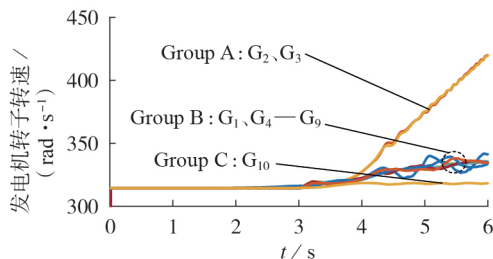


图9 10机39节点系统发电机转子转速
Fig.9 Generator rotor speed of 10-machine 39-bus system

同步发电机分为3个同调区域。通过上述系统失稳预判方法对每条线路的频率与无功功率进行监测。可知,系统在 $t=3.27$ s时开始失稳,并得到失步振荡中心形成的初始解列断面,如附录C图C2所示。

以图C2结果作为解列断面,子系统内功率不平衡程度较高。通过第3章同调区间重构方法进行解列断面的重配置,结果如附录C图C3所示。同时,2种解列断面下的同调区域功率平衡程度对比如表1所示。

表1 2种解列断面方案下的同调区域功率平衡程度对比
Table 1 Comparison of power balance degree in coherent regions under two splitting cross-section schemes

同调区间	子系统功率平衡程度 / %	
	初始解列断面方案	重构解列断面方案
Group A	-48.742	-11.867
Group B	-21.471	-21.471
Group C	13.267	5.598

在系统完成同调区间重构后,在 $t=3.8$ s时根据新的分区实施解列控制。重构后解列的发电机转子转速如图10所示。由图可知,解列后3个孤岛系统都维持稳定,由于Group A和Group B内部还存在一部分功率不平衡,因此发电机转子转速略快于标值。

从上述结果可知,本文所提出的方法提高了解列后子系统内的功率平衡程度,在一定程度上减轻了解列后的功率不平衡,有效地降低了系统的负荷损失。

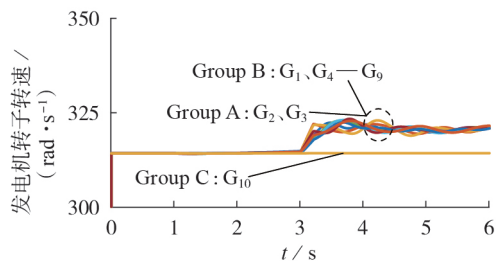


图10 重构后解列的发电机转子转速

Fig.10 Generator rotor speed splitted after reconstruction

4 结论

本文在新型电力系统背景下,对新能源运行特性导致的电力系统失稳特性动态化问题进行了深入研究,并针对电力系统第三道防线可靠性降低的问题,提出一种新的解决思路,并制定方案。本文的贡献如下:在机理层面,明晰了跟网型电源控制切换对系统失稳的影响,阐明了无功功率变化对失步振荡中心迁移的物理意义。通过有选择性地迁移失步振荡中心将失步振荡中心所形成的解列断面迁移到对系统解列以及稳定恢复更有帮助的位置。该方法兼顾传统解列断面选择的多种优点,不仅提高了解列的可靠性,还保证了经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 3-9.
XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 3-9.
- [2] 贾焦心, 沈钟毓, 秦本双, 等. 构网型和跟网型电力电子设备混联系统惯量响应的匹配问题综述[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 77-89.
JIA Jiaoxin, SHEN Zhongyu, QIN Benshuang, et al. Review on inertia response matching problem of hybrid power systems with grid-forming and grid-following power electronic devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 77-89.
- [3] 薛峰, 吴家龙, 崔晓丹, 等. 基于阻抗辨识的沽源地区风电并网系统次同步振荡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 200-207.
XUE Feng, WU Jialong, CUI Xiaodan, et al. Sub-synchronous oscillation control strategy based on impedance identification for wind power grid-connected system in Guyuan area of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 200-207.
- [4] 韩泽雷, 鞠平, 秦川, 等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 112-124.
HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124.
- [5] CORDOVA-GARCIA J, WANG X, XIE D L, et al. Control of communications-dependent cascading failures in power grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5021-5031.
- [6] RAMPURKAR V, PENTAYYA P, MANGALVEDEKAR H A, et al. Cascading failure analysis for Indian power grid [J].

- IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4):1951-1960.
- [7] 江毅, 翁汉琍, 曹善康, 等. 一种多地DFIG联动控制的多馈入受端系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9):3452-3463.
JIANG Yi, WENG Hanli, CAO Shankang, et al. A continuous commutation failure suppression strategy for multi-site DFIG linkage control of multi-feeder receiver systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9):3452-3463.
- [8] ALINEJAD B, KAZEMI K H. Out-of-step protection based on equal area criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2):968-977.
- [9] 刘天琪, 傅镜峰, 何川, 等. 考虑系统一次频率响应特性与新能源不确定性的主动解列最优断面搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12):4568-4581.
LIU Tianqi, FU Jingfeng, HE Chuan, et al. Optimal controlled islanding strategy considering primary frequency response and uncertain renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12):4568-4581.
- [10] 郑超, 孙华东, 邓嘉熙. 基于广域支路响应的功角失稳主动解列控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11):3885-3896.
ZHENG Chao, SUN Huadong, DENG Jiaqing. Active splitting control of rotor angle instability based on wide area branches' response[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11):3885-3896.
- [11] 刘道伟, 李宗翰, 李柏青, 等. 基于电压相量空间的电网失步中心特性解析及精准定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10):3068-3077.
LIU Daowei, LI Zonghan, LI Baiqing, et al. Power grid out-of-step center characteristic analysis and accurate locating method based on voltage phase space[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10):3068-3077.
- [12] ZHANG S, ZHANG Y X. Characteristic analysis and calculation of frequencies of voltages in out-of-step oscillation power system and a frequency-based out-of-step protection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1):205-214.
- [13] ZHANG S, ZHANG Y X. A novel out-of-step splitting protection based on the wide area information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1):41-51.
- [14] 张艳霞, 李杰, 张帅, 等. 基于广域测量信息的失步中心快速定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4):1-8.
ZHANG Yanxia, LI Jie, ZHANG Shuai, et al. Fast locating method of out-of-step center based on wide area measurement information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):1-8.
- [15] 林济铿, 李胜文, 吴鹏, 等. 电力系统最优主动解列断面搜索模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13):86-94, 195.
LIN Jikeng, LI Shengwen, WU Peng, et al. Model and algorithm for the optimal controlled partitioning of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):86-94, 195.
- [16] 贾骏, 谢天喜, 陈舒, 等. 基于凸优化理论的电力系统主动解列最优断面搜索研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1):168-177, 353.
JIA Jun, XIE Tianxi, CHEN Shu, et al. Controlled islanding method of power system based on convex optimization theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):168-177, 353.
- [17] ZHANG Y, ZHANG S, WANG J. A power system out-of-step splitting control system based on wide area information and an on-line searching scheme of optimal splitting section[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126:106587.
- [18] 马丁, 唐可翻, 乔煌煌, 等. 以维持重要负荷供电为目标的交直流系统自适应解列方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3149-3159.
MA Ding, TANG Kexuan, QIAO Huanghuang, et al. Adaptive islanding control method applied to AC/DC power systems aiming at maintaining the power supply of crucial loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11):3149-3159.
- [19] 魏孝卿, 唐飞, 张童彦, 等. 高比例风电接入场景下失稳预判与关键支路初筛方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18):6740-6752.
WEI Xiaoqing, TANG Fei, ZHANG Tongyan, et al. Research on instability prediction and key branches primary screening method under high proportion of wind power integrated situation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18):6740-6752.
- [20] 刘佳乐, 唐飞, 廖清芬, 等. 双馈风机接入对电力系统失步振荡中心迁移的影响[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2561-2568.
LIU Jiale, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Impacts of DFIG-based wind power system on out-of-step center migration[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2561-2568.
- [21] 王飞飞, 唐飞, 刘涤尘, 等. 大规模集中式光伏并网场景下电力系统失步振荡中心迁移特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(11):3656-3665.
WANG Feifei, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Migration characteristics of out-of-step center in power system under large-scale centralized photovoltaic grid-connected scene[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3656-3665.
- [22] 刘津濂, 徐政, 杨健, 等. 关于多特征自变量调节的含UPFC电力系统的潮流变化率特性[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1):186-191, 210.
LIU Jinlian, XU Zheng, YANG Jian, et al. Regulation principle of power flow gradient to multiple characteristic independent variables in UPFC embedded power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):186-191, 210.
- [23] 程启明, 张昕, 赖宇生, 等. 基于矩阵变换器的UPFC简化调制模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6):183-189.
CHENG Qiming, ZHANG Xin, LAI Yusheng, et al. Simplified modulation model predictive control of UPFC based on DMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6):183-189.
- [24] 刘福锁, 方勇杰, 吴雪莲, 等. 失步振荡下瞬时频率特性及振荡中心定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4):986-992.
LIU Fusuo, FANG Yongjie, WU Xuelian, et al. Instantaneous frequency characteristics and oscillation center location method for out of step oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4):986-992.

作者简介:

翁汉琍(1980—),女,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析、继电保护与控制(E-mail:honey_weng@163.com);

江毅(1998—),男,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:840618168@qq.com);

林湘宁(1970—),男,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统保护与控制、新能源发电(E-mail:linxiangning@hotmail.com)。

(编辑 王锦秀)

(下转第170页 continued on page 170)

Fast tracking method of inertia constant of new energy power system based on system identification

ZHANG Bo¹, ZHANG Chengjian¹, ZHANG Jing², WANG Lei³, LI Tiecheng³

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Department of Electrical Engineering, Jiangxi Electric Power Vocational and Technical College,
Nanchang 330032, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Aiming at the problem of quantitative inertia evaluation of new energy power system, the system inertia constant tracking method based on system identification is studied. The method is divided into two categories: non-recursive algorithm and recursive algorithm, to analyze the difference and internal relationship of calculation storage and identification speed from the identification principle perspective, and IEEE typical system is used to compare and verify the experimental examples. Theoretical analysis and experimental results show that the recursive algorithm has high identification accuracy, stable identification results and fast identification speed. It is suitable for the identification objects with large number of nodes and complex structure, which is conducive to the real-time monitoring and fast perception of the new energy power system inertia constant.

Key words: new energy; electric power systems; inertia constant; system identification; quantitative evaluation; non-recursive algorithm; recursive algorithm

(上接第162页 continued from page 162)

Coherent network reconstruction strategy for dynamic instability evolution process in novel power system

WENG Hanli¹, JIANG Yi², LIN Xiangning³, WEI Fanrong³, LI Zhenxing¹

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Fuzhou Changle District Electric Power Supply Company, Fuzhou 350200, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The uncertainty and nonlinearity of new energy in the novel power system affect the instability characteristics of traditional power system, making it difficult to accurately implement existing out-of-step splitting strategies. A coherent interval reconstruction strategy is proposed based on clarifying the impact of new energy power change on oscillation center migration. Taking the source-load balance rate and load loss ratio of the decomposed subsystem as the optimization objectives, the reactive power regulation capability of power flow controller is used to adjust the position of out-of-step oscillation center within a certain range. The splitting sections after reconstruction reduce the possibility of new energy equipment being disconnected from the grid under unstable condition, and consider the good coherence brought by dividing the out-of-step oscillation center. The effectiveness of the proposed strategy is verified by PSCAD simulation comparison.

Key words: new energy; out-of-step splitting; coherent interval reconstruction; out-of-step oscillation center; load loss

附录 A

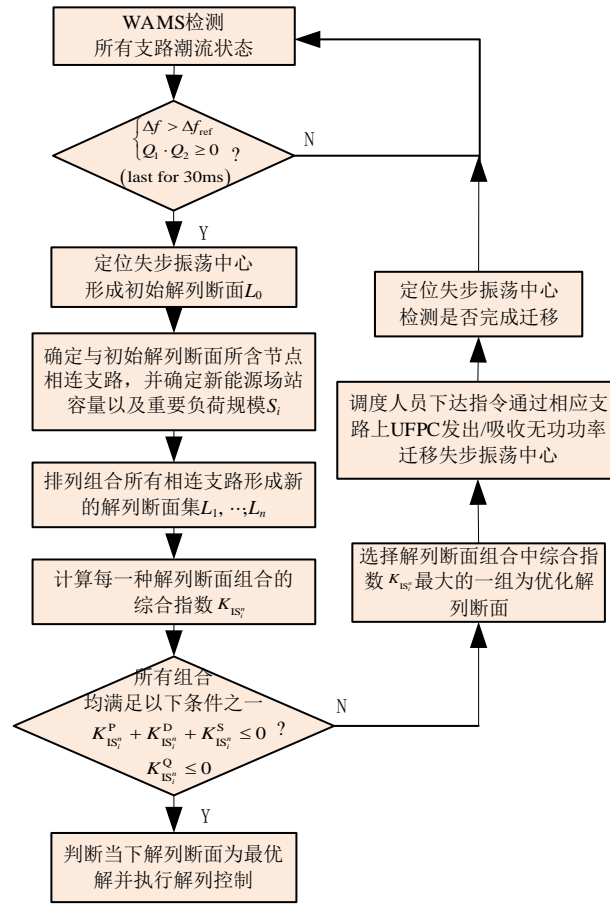


图 A1 同调区间重构流程图

Fig.A1 Flowchart of homology interval reconstruction

附录 B

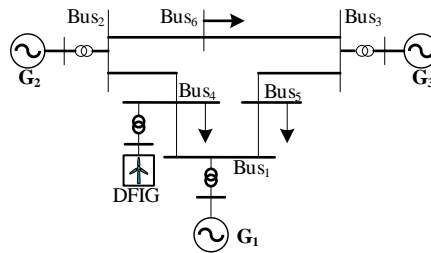


图 B1 含新能源的 3 机 9 节点系统

Fig.B1 9-bus system with new energy

附录 C

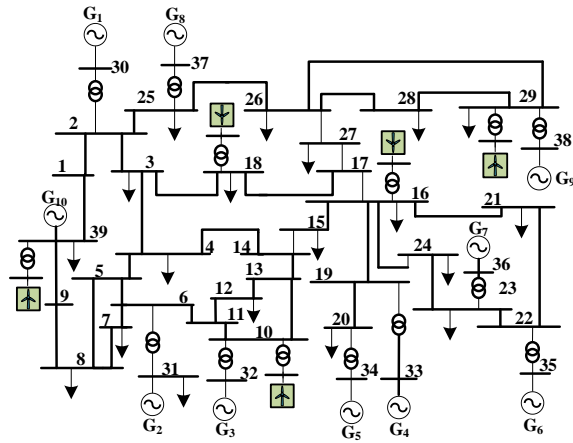


图 C1 含新能源的 10 机 39 节点系统

Fig.C1 39-bus system with new energy

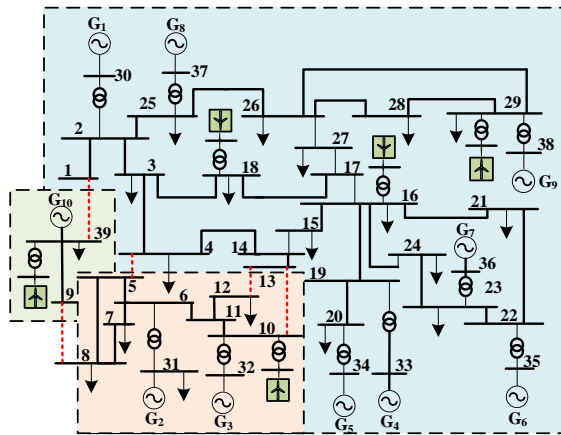


图 C2 初始解列断面

Fig.C2 Initial splitting section

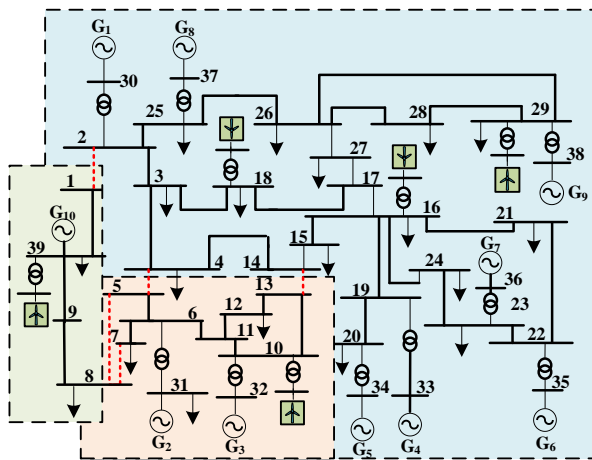


图 C3 解列断面重构结果

Fig.C3 Split section reconstruction results