

功角稳定BTTC法与支路暂态势能法关联评析

郑超,牛振波,吕思卓

(中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:网络节点和支路的受扰信息易于量测,适用于基于响应的稳定分析与控制场景。针对典型两机功率传输系统,分析随功角摇摆的网络节点电压相位及支路相位差的空间分布与时间变化特征,在此基础上,提出基于网络受扰响应构建表征功角稳定水平的指标通用范式;分析支路暂态输电能力(BTTC)法和BTTC指标以及支路暂态势能法与支路稳定测度指标的一致性 with 差异性,针对支路稳定测度指标应用约束瓶颈,提出一种实用的简化策略。面向交直流混联复杂多机系统的仿真表明,BTTC指标和简化的支路稳定测度指标均具有随着功角稳定性的恶化而单调递减、准确定位关键支路等性能,两者结合应用可提高响应式稳定判别的可靠性。

关键词:功角稳定;网络受扰响应;BTTC;支路暂态势能;稳定指标

中图分类号:TM712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202411022

0 引言

连接各发电机的输电网络是机组间不平衡功率交换的纽带。在大扰动冲击后,受与故障点电气距离远近等差异因素的影响,系统中各机组转子承担的不平衡功率有所不同,机组间的相对功角出现摇摆,能否维持有界变化保持功角稳定取决于因电压幅值和相位波动而变化的输电网络送受电功率能否对超前机组和滞后机组进行有效制动和驱动,从而减小转速偏差,使功角趋同。当前,电网停电事故依然时有发生,功角失稳仍是威胁电网稳定的重要因素之一^[1-2]。面向持续发展的电力系统,功角稳定分析与控制仍需要不断的技术进步与方法创新^[3]。

从信息来源角度,功角稳定分析与控制方法可划分为基于机组和基于网络受扰信息2类。在以机组响应为信息源的方法中:基于数据分析的时域仿真法和人工智能法缺乏定量评估和机理解释能力;暂态能量函数法、扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)法、相轨迹特征法等通常基于惯量中心坐标系,由于涉及全网机组,响应信息量巨大且部分信息难以量测,因此难以适用于基于响应的“实时分析、实时决策”模式^[4]。

在机组功角摇摆的过程中,空间分布不同的网络节点和支路电气量也会相应变化并呈现出差异,其中蕴含着能表征功角稳定性水平的特征信息^[5-6]。广域量测系统已广泛配置于主干输电网,基于网络信息实施响应式分析与控制具备技术可行性。基于

网络信息的功角稳定分析与控制涉及定量评估指标、薄弱环节识别、稳定紧急控制和失稳解列控制4个方面。在定量评估指标方面:文献[6]基于支路有功功率和两端节点电压相位差,提出构建稳定测度指标的支路暂态势能法;文献[7]基于支路势能与归一化动能介数,构建暂态脆弱度评价指标;文献[8]基于广域动态轨迹信息,利用动态轨迹的几何特征评估系统的暂态稳定水平。在薄弱环节识别方面:文献[9]定义支路同步力系数,用于识别与功角稳定强关联的输电断面;文献[10]基于网络暂态能量变化规律,定义支路和割集脆弱性指标,可有效识别关键支路和关键割集;文献[11]在支路势能函数和势能脊方法的基础上,推导出临界割集识别判据。在稳定紧急控制方面:文献[12]提出基于网络能量的双馈风机并网系统紧急控制策略;文献[13]运用改进的支路暂态能量函数,建立一种考虑风力发电机的最优切机决策模型。在失稳解列控制方面:文献[14]研究新能源影响下同步调相机的暂态功角加速失稳过程,基于等面积定则解释其失稳机理并提出暂态失稳判据;文献[15]分析基于相位角的失步解列判据在复杂场景下的适应性;文献[16]提出利用相量测量单元提供的信息完成解列割集的搜索,推动了对功角失稳系统的主动解列控制研究。文献[17-18]针对功角失稳系统节点频率变化特征的相似性和差异性,提出一种确定解列割集的方法。

支路暂态势能法是基于网络受扰响应的功角稳定分析与控制方法中的重要分支,已应用于实际电网。支路暂态输电能力(branch transient transmission capability, BTTC)法是近年来提出的方法,在功角稳定定量评估^[19]、形态判别^[20]、紧急控制^[21]、主动解列^[22]等方面表现出良好性能,已初步具备体系性。本文分析机组功角摇摆过程中网络节点电压相位及

收稿日期:2023-12-28;修回日期:2024-07-19

在线出版日期:2024-12-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2400800)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2021YFB2400800)

支路相位差的时空分布特征,提出基于网络受扰响应构建表征功角稳定水平的指标通用范式;明晰BTTC法及BTTC指标(sBTTC)与支路暂态势能法和支路稳定测度指标(S_{SBI})的一致性与差异性,并提出 S_{SBI} 指标的实用简化策略。复杂多机系统的仿真表明,sBTTC指标和简化的 S_{SBI} 指标均具有随着功角稳定性的恶化而单调递减、准确定位关键支路等性能,二者结合应用可提高响应式稳定判别的可靠性。

1 随功角摇摆的网络节点电压相位分布

1.1 两机系统中节点电压相位分布特征

针对图1所示的典型两机功率传输系统进行功角稳定研究,其电气量相量关系如附录A图A1所示。图1中: E_a 、 E_s 分别为超前机群等值机机端节点 n_a 和滞后机群等值机机端节点 n_s 的电压幅值; δ 为超前等值机功角; n_1 — n_9 为等分节点 n_a 与节点 n_s 间传输支路的若干节点,节点 n_5 为系统电气中点; λ_M 为观测节点 M 相对节点 n_5 的位置系数,取值范围为0~1; X_{as} 为传输支路总电抗; U_M 、 θ_M 分别为观测节点 M 的电压幅值和相位; B_{a9} 、 B_{98} 、 B_{87} 、 B_{76} 、 B_{65} 、 B_{54} 、 B_{43} 、 B_{32} 、 B_{21} 、 B_{1s} 、 B_{64} 、 B_{31} 为连接相应等分节点的支路段。

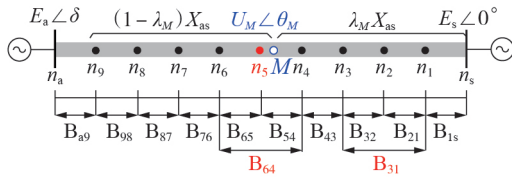


图1 典型两机功率传输系统

Fig.1 Typical two-machine power transmission system

对应图1所示无损传输系统,发电机电磁功率 P_e 与任意支路 i 的有功功率 P_{li} 相等,如式(1)所示。

$$P_e = \frac{E_a E_s}{X_{as}} \sin \delta = P_{li} = \frac{U_{mi} U_{ni}}{X_{mni}} \sin \Delta \theta_i \quad (1)$$

式中: U_{mi} 、 U_{ni} 和 X_{mni} 分别为支路 i 的两端节点 m 、 n 的电压幅值和支路电抗; $\Delta \theta_i$ 为支路 i 两端节点的电压相位差,即 $\Delta \theta_i = \theta_{mi} - \theta_{ni}$, θ_{mi} 、 θ_{ni} 分别为支路 i 两端节点 m 、 n 的电压相位。

图2所示为机组 P_e - δ 曲线。图中: P_e 为标么值; δ_{180} 为发电机摆开至 180° 时的功角。由临界稳定时加速面积 A_{acc} 与减速面积 A_{dec} 相等的等面积原理可知,对应故障期间零电磁功率输出即 $P_e=0$ 的临界故障切除功角 δ_c 可由式(2)确定。将式(1)代入式(2)可得到 δ_c ,如式(3)所示。

$$\int_{\delta_c}^{\delta_s} P_{m0} d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_u} (P_e - P_{m0}) d\delta \quad (2)$$

$$\delta_c = \arccos \left[\frac{X_{as} P_{m0}}{E_a E_r} (\delta_u - \delta_s) + \cos \delta_u \right] \quad (3)$$

式中: P_{m0} 为机组机械功率; δ_s 、 δ_u 分别为稳定平衡点

和不稳定平衡点对应的功角。在 $X_{as}=0.5$ p.u.、 $E_a=E_s=1.0$ p.u.以及机组机械功率 $P_{m0}=1.2$ p.u.的条件下, δ_s 、 δ_c 和 δ_u 分别为 36.86° 、 71.77° 和 143.14° 。

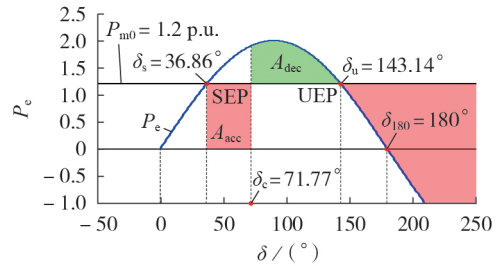


图2 机组 P_e - δ 曲线

Fig.2 P_e - δ curve of unit

1.2 两机系统中支路相关电气量的变化特征

如图A1所示,在相同幅值 E_a 、 E'_a 、 E''_a 和不同摇摆功角 δ 、 δ' 、 δ'' 下,观测节点 M 的电压幅值 U_M 、 U'_M 、 U''_M 和相位 θ_M 、 θ'_M 、 θ''_M 大小会动态变化。由叠加原理可计算观测节点 M 的电压相量,如式(4)所示。

$$U_M = \lambda_M E_a e^{j\delta} + (1 - \lambda_M) E_s =$$

$$\lambda_M k_a E e^{j\delta} + (1 - \lambda_M) k_s E = d_{aM} e^{j\delta} + d_{sM} \quad (4)$$

式中: k_a 、 k_s 为内电势幅值系数; E 为基准内电势; $E_a = k_a E$ 、 $E_s = k_s E$; d_{aM} 、 d_{sM} 分别为节点 M 与超前机组和滞后机组之间的综合电气距离系数,分别为 $\lambda_M k_a E$ 和 $(1 - \lambda_M) k_s E$ 。

由式(4)可计算节点 M 的电压幅值 U_M 和相位 θ_M ,分别如式(5)、(6)所示。可以看出, U_M 、 θ_M 取决于 δ 和 λ_M 这2个因素,具有时空分布差异特征。此外, U_M 、 θ_M 与 δ 、 λ_M 间具有强非线性关系。 $\delta > \arccos(k_s/k_a)$ 后:若 λ_M 小于输电系统电气中点对应的位置系数 λ_{M0} ,则相量 U_M 位于图A1所示 xy 平面的第一象限, $\theta_M < 90^\circ$;若 λ_M 大于 λ_{M0} ,则相量 U_M 位于第二象限, $\theta_M > 90^\circ$ 。当 δ 逼近 180° 时,具有不同 λ_M 取值的各空间位置节点以 λ_{M0} 为界,近超前和近滞后机组侧节点的 θ_M 分别趋于 180° 和 0° , λ_{M0} 对应的节点电压幅值趋近于0且该节点演变为系统振荡中心。

$$U_M = F_U(\lambda_M, \delta) =$$

$$E \sqrt{(\lambda_M k_a)^2 + 2\lambda_M (1 - \lambda_M) k_a k_s \cos \delta + [(1 - \lambda_M) k_s]^2} \quad (5)$$

$$\theta_M = F_\theta(\lambda_M, \delta) = \arctan \frac{\lambda_M k_a \sin \delta}{\lambda_M k_a \cos \delta + (1 - \lambda_M) k_s} \quad (6)$$

$$\lambda_{M0} = \frac{k_s}{k_s - k_a \cos \delta} \quad (7)$$

式中: $F_U(\lambda_M, \delta)$ 、 $F_\theta(\lambda_M, \delta)$ 分别为节点 M 的电压幅值、相位与 λ_M 和 δ 之间的函数关系表达式。

对应图1所示系统,在 δ 由 0° 增至 180° 的过程中,与支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 相关的电气量如附录A图A2所示。随着 δ 的增大,各节点电压幅值均单调递减,

愈趋近电气中点 n_5 , 递减幅度越大。以电气中点 n_5 为界, 近超前机组侧节点 $n_6 - n_8$ 相位增至 180° , 近滞后机组侧节点 n_1, n_3, n_4 相位则先增加后减小并趋于 0° , 仅有 1 条电气中点落点的支路 B_{64} 相位差持续增大, 与 δ 的趋势维持一致。机组 $P_e - \delta$ 和各支路段 $P_{li} - \Delta\theta_i$ 曲线如附录 A 图 A2(d) 所示。与图 2 所示稳定平衡点的 δ_s 、故障切除点的 δ_c 和不稳定平衡点的 δ_u 对应的支路 B_{64} 相位差 $\Delta\theta_{64s}$ 、 $\Delta\theta_{64c}$ 、 $\Delta\theta_{64u}$ 分别为 7.63° 、 16.46° 和 61.84° 。

对于具有复杂拓扑结构的多机输电系统, 暂态功角失稳通常最初为两群失稳, 两群机组功角摆开后, 受网络节点电压跌落的影响, 部分机组电磁功率受阻, 进而形成新的机群, 最后发展为多群失稳^[16]。网络中任意节点 x 的电压相量 U_{cx} 由各机组内电势相量经线性叠加形成^[17], 如式(8)所示。

$$U_{cx} \approx \sum_{p=1}^{N_{gA}} Z'_{cgp} k_p E e^{j\delta_p} + \sum_{q=1}^{N_{gB}} Z'_{cgq} k_q E e^{j\delta_q} = D_{sA} E e^{j\delta_A} + D_{sB} E e^{j\delta_B} \quad (8)$$

式中: N_{gA} 、 N_{gB} 分别为超前机群 A 和滞后机群 B 的机组数量; Z'_{cgp} 、 Z'_{cgq} 为相关阻抗矩阵中的元素; k_p 、 k_q 分别为超前、滞后机群中机组内电势幅值系数; δ_A 、 δ_B 分别为超前机群 A 和滞后机群 B 的功角中心; D_{sA} 、 D_{sB} 分别为节点 x 与超前机群 A 和滞后机群 B 之间的等效电气距离系数。

对比式(8)和式(4)可知, 二者具有相同的形式, 因此, 对于满足 $D_{sA} = D_{sB}$ 的电气中点落点的 1 条支路或 1 个割集中的多条支路, 在机群功角失稳时其电压、相位及功率呈现出与图 A2 相似的变化过程。

2 BTTC 法与支路暂态势能法

2.1 基于网络响应的稳定指标通用范式

功角失稳过程是源端机组与网络支路相互作用的过程, 原因在于: 从机组上看, 故障切除后电磁功率大于机械功率形成的制动减速面积 A_{dec} 小于故障期间的驱动加速面积 A_{acc} , 机组越过不稳定平衡点并再次因受驱动而失速, 如图 2 所示; 从网络上, 支路功率与电压幅值和相位呈非线性关系, 无法随着机组功角的增大而单调递增, 当功角摆幅增加导致部分支路因两端节点电压幅值跌落和相位差增大而出现阻塞, 直至阻断机组间不平衡功率交换时, 超前和滞后机组无法有效制动和驱动, 转速差增大, 机组失去同步。

由 1.2 节可知, 在功角摆幅增大、稳定性降低的过程中, 网络中至少存在 1 条支路呈现出两端节点电压幅值持续跌落且两端节点相位差与机组功角始终同趋增大的特征。基于以上分析, 构建基于网络受扰响应表征功角稳定水平的指标通用范式 I_{CEP} , 如式(9)所示。 I_{CEP} 具有随支路电抗 X_{mni} 增大、 U_{mi} 和 U_{ni}

减小、 $\Delta\theta_i$ 增大而递减的特性, 即满足式(10)。

$$I_{CEP} = \Phi(X_{mni}, U_{mi}, U_{ni}, \Delta\theta_i) \quad (9)$$

$$\frac{dI_{CEP}}{dX_{mni}} < 0, \frac{dI_{CEP}}{dU_{mi}} > 0, \frac{dI_{CEP}}{dU_{ni}} > 0, \frac{dI_{CEP}}{d\Delta\theta_i} < 0 \quad (10)$$

式中: $\Phi(X_{mni}, U_{mi}, U_{ni}, \Delta\theta_i)$ 为功角稳定指标与多个变量之间的函数关系表达式。

需要指出的是, 式(9)、(10)中可单独选取 X_{mni} 、 U_{mi} 、 U_{ni} 和 $\Delta\theta_i$ 中的部分变量, 也可选取部分变量的组合, 如电压乘积 $U_{mi} U_{ni}$ 。

2.2 BTTC 法及 sBTTC 指标

文献[19-20]定义了一种满足式(10)的简化支路暂态输电能力指标 sBTTC, 如式(11)所示。为提升关键支路识别的可靠性, 引入支路垂足电压位置系数 ξ_{vi} , 由于关键支路是电气中点落点的支路, 沿线最低电压即支路垂足电压位于该支路之上, 有 $\xi_{vi} \in [1, 2]$ 。为此, 关键支路 k 由式(12)筛选识别。由式(11)可得 $dI_{sBTTCi}/d(U_{mi} U_{ni})$ 和 $dI_{sBTTCi}/d\Delta\theta_i$, 如式(13)所示, 其中, I_{sBTTCi} 为支路 i 的 sBTTC, $\Delta\theta_i \in [0^\circ, 180^\circ]$ 均满足式(10)。

$$I_{sBTTCi} = \Psi_U \Psi_\theta = U_{mi} U_{ni} \cos^2 \frac{\Delta\theta}{2} \quad (11)$$

$$k = \operatorname{argmin}_{i \in \{1, 2, \dots, N_L\}} \{I_{sBTTCi} | 1 < \xi_{vi} < 2\} \quad (12)$$

$$\frac{dI_{sBTTCi}}{d(U_{mi} U_{ni})} = \cos^2 \frac{\Delta\theta_i}{2}, \frac{dI_{sBTTCi}}{d\Delta\theta_i} = -\sin \Delta\theta_i \quad (13)$$

式中: Ψ_U 、 Ψ_θ 分别为电压因子和相位因子; N_L 为系统中的总支路数; ξ_{vi} 为支路 i 的支路垂足电压位置系数。

与图 A2 对应, 在 δ 由 0° 增至 180° 的过程中, 支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 的 sBTTC 指标如附录 A 图 A3 所示。可以看出, 各支路指标均随着 δ 的增大而单调减小, 电气中点 n_5 落点的支路 B_{64} 始终具有最小指标值, 是关键支路。当 δ 达到 δ_u 即 $\Delta\theta_{64}$ 达到 $\Delta\theta_{64u}$ 时, 关键支路 k 的 sBTTC 为 0.069; 当 δ 达到 δ_{180} 时, $\Delta\theta_{64}$ 达到 $\Delta\theta_{180}$, 此时关键支路 k 的 sBTTC 为 0。

一方面, 由于关键支路 k 的 sBTTC 具有随着功角稳定性的恶化而单调下降的特性, 因此, 可结合预设门槛值进行判稳; 另一方面, 可结合关键支路功率、相位差、频率差等电气量及其对应的轨迹特征进行稳定性判别^[16]。

2.3 支路暂态势能法及 S_{sBI} 指标

在忽略阻尼的情况下, 多机系统拓扑结构保持的李雅普诺夫函数模型如式(14)所示^[9]。

$$V = V_{KE} + V_{PE} = \frac{1}{2} \sum_{g=1}^{N_G} M_g \omega_g^2 + \sum_{i=1}^{N_L} \int_{\Delta\theta_{is}}^{\Delta\theta_i} [P_{li}(\Delta\theta) - P_{lis}] d\Delta\theta \quad (14)$$

式中: V 、 V_{KE} 、 V_{PE} 分别为系统总能量、总动能和总势能; N_G 为系统中的总机组数; M_g 、 ω_g 分别为第 g 台机

组的惯量和角速度; P_{li} 、 $\Delta\theta_{is}$ 分别为故障后平衡状态下支路 i 的有功功率与两端节点电压相位差。

对于网络中的任意支路 i , 在相位差 $\Delta\theta_i$ 和时刻 t 的空间中, 沿故障后轨迹的支路暂态势能定义分别如式(15)和式(16)所示^[7]。势能 V_{PEi} 对时刻 t 的导数如式(17)所示。

$$V_{PEi}(\Delta\theta_i) = \int_{\Delta\theta_c}^{\Delta\theta_u} [P_{li}(\Delta\theta) - P_{lis}] d\Delta\theta \quad (15)$$

$$V_{PEi}(t) = 2\pi \int_{t_c}^t [P_{li}(t) - P_{lis}] \Delta f_i(t) dt \quad (16)$$

$$\frac{dV_{PEi}}{dt} = 2\pi [P_{li}(t) - P_{lis}] \Delta f_i(t) \quad (17)$$

式中: $\Delta\theta_{ic}$ 为故障切除时刻 t_c 对应的支路 i 两端节点电压相位差; $\Delta f_i(t)$ 为 t 时刻的频率差。

由式(17)可以看出, 若 t 时刻 V_{PEi} 出现极值即 $dV_{PEi}/dt=0$, 则与 $t-\Delta t$ (Δt 为采样间隔) 时刻相比, t 时刻会出现 $\Delta f_i(t)$ 正负变号或 P_{li} 穿越 P_{lis} 。 Δf_i 正负变号意味着相位差绝对值开始减小, 不会趋于无界失稳。故障后平衡状态下的有功功率 P_{li} 可对应故障后系统稳定平衡点和不稳定平衡点2种状态。若持续回摆使 V_{PEi} 达到极小值且 P_{li} 穿越 P_{lis} , 则对应穿越稳定平衡点, 系统稳定; 若持续前摆使 V_{PEi} 达到极大值且 P_{li} 穿越 P_{lis} , 则对应穿越不稳定平衡点, 系统失稳。

在故障后支路 i 的势能 V_{PEi} 经第1次最小值 t_{ai} 或 $\Delta\theta_{ai}$ 对应时刻至第1次最大值 t_{bi} 或 $\Delta\theta_{bi}$ 对应时刻的区段, 定义支路 i 的稳定测度指标 S_{SBIi} , 如式(18)或式(19)所示。 S_{SBIi} 的分子以 P_{li} 与 P_{lis} 之间的偏差大小刻画当前状态与系统不稳定平衡点之间的距离即稳定裕度, 分母则界定势能增大、稳定性恶化的考察区段。

$$S_{SBIi}(t) = \frac{P_{li}(t) - P_{lis}}{V_{PEi}(t, t_{ai})} \quad t \in (t_{ai}, t_{bi}) \quad (18)$$

$$S_{SBIi}(\Delta\theta_i) = \frac{P_{li}(\Delta\theta_i) - P_{lis}}{V_{PEi}(\Delta\theta_i, \Delta\theta_{ai})} \quad \Delta\theta_i \in (\Delta\theta_{ai}, \Delta\theta_{bi}) \quad (19)$$

$$V_{PEi}(\Delta\theta_i, \Delta\theta_{ai}) = \int_{\Delta\theta_a}^{\Delta\theta_i} [P_{li}(\Delta\theta) - P_{lis}] d\Delta\theta =$$

$$V_{PEi}(t, t_{ai}) = \int_{t_{ai}}^t [P_{li}(t) - P_{lis}] dt \quad (20)$$

式中: $V_{PEi}(t, t_{ai})$ 、 $V_{PEi}(\Delta\theta_i, \Delta\theta_{ai})$ 分别为 t 和 $\Delta\theta_i$ 对应时刻的势能相对第1次最小值势能的增量势能。

将系统稳定测度指标 S_{SSI} 定义为网络中具有绝对值最小的支路稳定测度指标, 如式(21)所示。

$$S_{SSI}(t) = \min_{i \in \{1, 2, \dots, N_i\}} \{S_{SBIi}(t)\} \quad (21)$$

在图A2中 δ 由 0° 增至 180° 的过程中, 以支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 为例, 其相位差、势能 V_{PE} 以及 S_{SBI} 指标如附录A图A4所示, 计算中涉及各支路 P_{lis} 均为 P_{m0} 。

在 $\delta > \delta_c$ 后, P_{li} 和 $\Delta\theta_i$ 均增大, 如图A4(a)所示, 因此, δ_c 即对应故障后各支路势能第1次最小值的时刻, 对应支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 的相位差分别为 $\Delta\theta_{a31}$ 、 $\Delta\theta_{a64}$ 、 $\Delta\theta_{a87}$ 。在 δ 由 δ_c 增至 δ_u 的过程中, $P_{li} > P_{m0}$, 在对应 δ_{b31} 、 δ_{b87} 及 $\Delta\theta_{b31}$ 、 $\Delta\theta_{b87}$ 的时刻, 支路 B_{31} 、 B_{87} 的相位差先后达到最大值, 势能也相应增至第1次最大值, 支路 B_{64} 的势能则因 $\Delta\theta_{64}$ 的持续增大而增加, 直至 $\delta > \delta_u$, 越过不稳定平衡点后, $P_{li} < P_{m0}$, 如图A4(b)所示。在对应支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 势能最小值与最大值间的考察区段 (δ_c, δ_{b31}) 、 (δ_c, δ_u) 、 (δ_c, δ_{b87}) , 也即 $(\Delta\theta_{a31}, \Delta\theta_{b31})$ 、 $(\Delta\theta_{a64}, \Delta\theta_{b64})$ 、 $(\Delta\theta_{a87}, \Delta\theta_{b87})$, 对应的 S_{SBI} 均单调递减, 且以支路 B_{64} 的 S_{SBI} 最小值表征系统稳定性的 S_{SSI} , 如图A4(c)所示。

3 2种方法的关联评析

3.1 2种方法的一致性

综合第2章面向典型两机功率传输系统的分析可知, BTTC法与支路暂态势能法在以下3个方面具有一致性。

1) 量测信息。2种方法均立足于易于量测的网络受扰响应, 以节点电压、相位以及支路有功功率为信息源, 分别构建定量评估指标 sBTTC 和 S_{SBI} 。

2) 降维表征。2种方法分别基于 sBTTC 和 S_{SBI} 排序, 筛选具有最小值指标的关键支路, 并以关键支路的 sBTTC、 S_{SBI} 指标降维来表征复杂大电网功角稳定水平。

3) 归属范式。式(13)的 $dI_{sBTTCi}/d(U_{mi}U_{ni})$ 和 $dI_{sBTTCi}/d\Delta\theta_i$ 符合式(9)、(10)所示基于网络受扰响应构建表征功角稳定水平的指标通用范式。指标 S_{SBI} 与通用范式的关系分析如下。

将式(1)中的 P_{li} 代入式(19), 可得式(22)。可以看出, S_{SBIi} 是以 U_{mi} 、 U_{ni} 和 $\Delta\theta_i$ 为变量构造的符合式(9)的指标。

$$S_{SBIi}(\Delta\theta_i) = \frac{U_{mi}U_{ni} \sin \Delta\theta_i - C_{is}}{\int_{\Delta\theta_a}^{\Delta\theta_i} (U_{mi}U_{ni} \sin \Delta\theta_i - C_{is}) d\Delta\theta} \quad (22)$$

式中: $C_{is} = U_{mis}U_{nis} \sin \Delta\theta_{is}$ 为常量, U_{mis} 、 U_{nis} 、 $\Delta\theta_{is}$ 分别为系统处在不稳定平衡点时支路 i 的两端节点电压和相位差。

由式(5)、(6)可知, U_M 与 θ_M 之间具有复杂的隐函数关系, 因此难以解析表达 dS_{SBIi}/dU_{mi} 、 dS_{SBIi}/dU_{ni} 和 $dS_{SBIi}/d\Delta\theta_i$ 。综合图A4(c)、图A2(c)和图A4(a), 在对应支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 势能最小值与最大值间的考察区段 $(\Delta\theta_{a31}, \Delta\theta_{b31})$ 、 $(\Delta\theta_{a64}, \Delta\theta_{b64})$ 、 $(\Delta\theta_{a87}, \Delta\theta_{b87})$, S_{SBI} 指标与支路两端节点电压幅度和相位差的关系如图3所示, 图中电压幅值 U 为标么值。可以看出, 各支路均满足式(23), 即支路暂态势能法的 S_{SBI} 指标符合式(10)所示的指标通用范式。

$$\frac{dS_{SBI}}{dU_{mi}} > 0, \frac{dS_{SBI}}{dU_{ni}} > 0, \frac{dS_{SBI}}{d\Delta\theta_i} < 0 \quad (23)$$

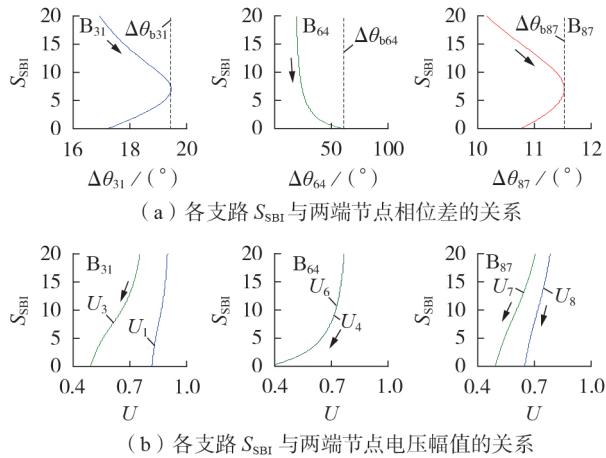


图 3 S_{SBI} 与支路两端节点相位差和电压幅值的关系
Fig.3 Relationship between S_{SBI} and phase difference and voltage amplitude of two terminal nodes of branch

3.2 2 种方法的差异性

作为 2 种不同的稳定性定量评估方法, BTTC 法与支路暂态势能法在以下 5 个方面存有差异性。

1) 持续轨迹信息。sBTTC 指标仅由当前采样时刻的支路节点电压幅值和相位差经代数计算求取, S_{SBI} 指标中涉及的势能则须沿故障后的支路功率和相位差轨迹路径进行积分计算。

2) 指标连续计算。所有采样时刻计算的 sBTTC 指标可形成连续曲线, 以表征功角摆开和回摆过程中稳定性的降低和回升; S_{SBI} 指标则定义于支路暂态势能最小值至最大值的增长区间, 对于功角多摆动过程须划分区段进行评估。

3) 主值区间大小。sBTTC 中的相位因子 Ψ_θ 取值区间为 $[0, 1.0]$, 由于在功角摇摆过程中电压最低跌落至 0, 最高波动幅度有限, 因此 sBTTC 指标的主值区间为 0 至近似 1.0; S_{SBI} 指标则由于在计算初期的势能增量小, 会趋于无穷大, 因此 $|S_{SBI}|$ 的主值区间为 $[0, +\infty)$ 。

4) 临界稳定指标。关键支路的 sBTTC 指标大小随着功角稳定性水平的降低而单调递减, 由于无法确定系统穿越不稳定平衡点的时刻, 因此不能精准确定临界状态稳定指标的大小; S_{SBI} 指标将支路势能最大值时刻的支路功率与故障后平衡态的功率偏差作为是否穿越不稳定平衡点的标志, 对应的临界状态 S_{SBI} 具有零值。

5) 故障后的平衡态。在 sBTTC 指标的计算中无需故障后的系统平衡态相关信息; 在 S_{SBI} 指标的计算中则需要故障后系统平衡态对应的各支路功率信息。

3.3 sBTTC 与简化的 S_{SBI} 指标的数值分布

3.3.1 基于支路暂态势能的简化的 S_{SBI} 指标

对于交直流混联复杂大电网: 一方面, 在故障激发的不平衡功率经机组一次调频、直流有功调制等慢动态调节后, 进入新平衡态的耗时长, 难以快速确定潮流转移分布后的各支路功率; 另一方面, 随着风电、光伏等电力电子装备大量并网, 单一故障引发低电压穿越乃至高低压脱网等连锁反应的风险加剧, 且反应路径难以提前预知。受故障后系统平衡态对应的各支路功率不易求解的制约, 支路暂态势能法尚难以在基于响应的系统稳定性实时判别与控制场景中应用。

关键支路 k 的 sBTTC_k 指标为 0, 对应支路两端节点电压相位差 $\Delta\theta_k$ 达到 180° 、有功功率 P_{lk} 为 0 的时刻, 如式 (11) 所示; S_{SBIk} 指标为 0, 对应支路两端节点电压相位差 $\Delta\theta_k$ 持续增大的过程中有功功率 P_{lk} 达到 P_{lis} 的时刻, 如式 (18) 或式 (19) 所示。与系统越过不稳定平衡点时 S_{SBIk} 指标具有零值相比, 虽然 sBTTC_k 指标在系统越过不稳定平衡点后会达到 0, 其时效性逊于 S_{SBIk} , 但可有效回避求解故障后平衡态各支路功率的难题。此外, 以 sBTTC_k 大于 0 的门槛值 ε_{th} 为条件, 或结合关键支路相轨迹凹凸性等响应特征, 可提升判稳时效性^[16]。

为适应基于响应的系统稳定性实时分析与控制场景, 避免因求解 P_{lis} 而造成 S_{SBI} 计算困难, 将 P_{lis} 统一取值为 0, 则式 (19) 变为式 (24)。图 A2 所示的 δ 由 0° 增至 180° 的过程中, 支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 势能以及简化的 S_{SBI} 指标 S_{sSBI} 如图 4 所示。

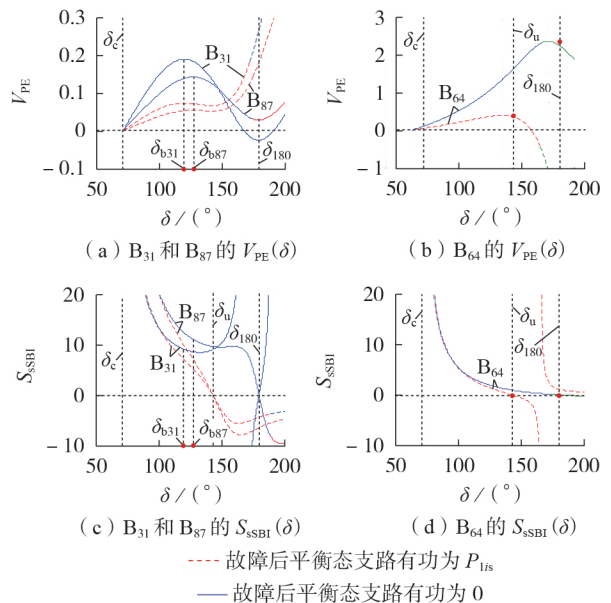


图 4 故障后不同平衡态支路有功功率取值下的势能和 S_{sSBI}

Fig.4 Potential energy and S_{sSBI} under different values of active power of branch at balance state after fault

$$S_{sSBI}(\Delta\theta_i) = \frac{P_{li}(\Delta\theta_i)}{V_{PEi}(\Delta\theta_{ui}, \Delta\theta_i)} = \frac{P_{li}(\Delta\theta_i)}{\int_{\Delta\theta_{ui}}^{\Delta\theta_i} P_{li}(\Delta\theta) d\Delta\theta} = \frac{U_{mi}U_{ni} \sin \Delta\theta_i}{\int_{\Delta\theta_{ui}}^{\Delta\theta_i} U_{mi}U_{ni} \sin \Delta\theta_i d\Delta\theta} \quad (24)$$

式中: S_{sSBI} 为简化的 S_{sBI} 指标。

由图4可知,在支路 B_{31} 、 B_{64} 、 B_{87} 的势能增至 δ_{b31} 、 δ_{b64} 、 δ_{b87} 对应的最大势能区段,这些支路的 S_{sBI} 指标均具有单调递减的特性,其中支路 B_{64} 具有最小的指标值。由于势能最大值点由 δ_u 后移至 δ_{180} , S_{sBI} 指标的零值也相应比 S_{sBI} 指标的滞后出现。由此可见,易于计算的 S_{sBI} 指标具有随着稳定性的恶化而单调递减的特点,且经排序筛选可识别表征系统稳定性的关键支路。

3.3.2 不同支路 sBTTC 与 S_{sBI} 的数值分布

如1.2节所述,随着机组功角的摇摆,网络中节点电压的幅值和相位具有时空分布差异。受此影响,在同一机组功角摇摆的过程中,基于两端节点电压幅值和相位差计算的 sBTTC 和 S_{sBI} 将因支路位置的不同而存在数值差异。在图A2中 δ 由 0° 增大至 180° 的过程中,跨越电气中点的支路 B_{61} 、 B_{63} 、 B_{64} 和支路 B_{71} 、 B_{73} 、 B_{74} , 以及支路 B_{81} 、 B_{83} 、 B_{84} 的 sBTTC 与 S_{sBI} 的数值差异如附录A图A5所示。可以看出,在 δ_u 对应的不稳定平衡点处,跨越电气中点的不同支路的 sBTTC 和 S_{sBI} 变化范围分别为 $[0.067, 0.087]$ 和 $[0.523, 0.936]$, 范围中的最大值与最小值均相近,因此,可通过设置这2种指标相应的临界指标进行判稳。

依次相邻支路 B_{31} 、 B_{43} 、 B_{64} 、 B_{76} 和 B_{87} 的 sBTTC 和 S_{sBI} 如图5所示。由图可知,相邻支路的 S_{sBI} 比

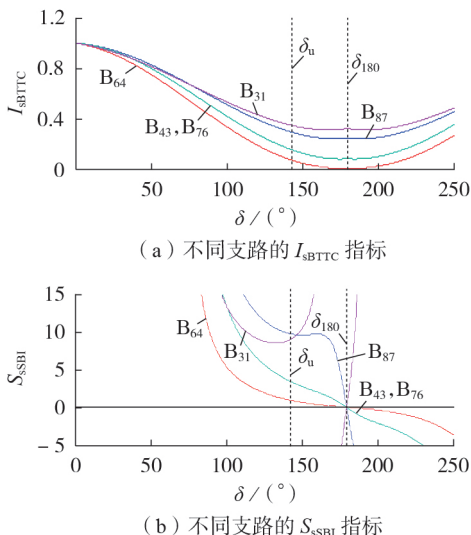


图5 依次相邻支路的 sBTTC 和 S_{sBI}

Fig.5 sBTTC and S_{sBI} of adjacent branches

sBTTC 具有更大的数值差异,有利于通过大小排序筛选定位关键支路。

综合以上分析,在基于网络受扰响应的稳定判别场景中,可同时应用 sBTTC 与 S_{sBI} 指标进行稳态态势监测和关键支路识别,两者互为校验以提升可靠性。例如,基于 sBTTC 与 S_{sBI} 指标识别的关键支路为同一支路且 sBTTC_k 与 S_{sBIk} 均小于分别设定的门槛值时,才判断失稳。

4 多机系统仿真分析

4.1 系统网架结构及功角稳定性

某 DB 区域电网中局部交直流混联外送 MD 电网结构如附录 B 图 B1 所示。其中 YM 至 MJ 的 ± 500 kV / 3 000 MW 超高压直流(以下简称 YMDC)送端交流电网通过 BH-XL-LD-FT、YM-YC-FT、YM-HC-WL 这 3 条交流支路 6 回 500 kV 线路与主网互联。YMDC 送电 2 000 MW, XL-LD、YC-FT、YM-HC 交流支路合计送电 3 520 MW, 当发生严重故障时存在功角失稳风险。

在 0.2 s 时 YC-FT 支路中的一回线发生三相永久短路故障,在 0.26 s 切除故障线路的同时 YMDC 发生单极闭锁故障,在同步旋转坐标系下 DB 电网 177 台发电机的功角曲线和 117 个 500 kV 计算节点的电压及相位差曲线如附录 B 图 B2 所示。可以看出,MD 机群相对 DB 机群的功角持续增大至失去同步,同时,网络节点电压大幅跌落并呈现周期性振荡,FT-HC、YC-FT、XL-LD 这 3 条支路的两端节点电压相位差持续增大趋于无界,形成了对应机群功角失稳的网络失步割集。

4.2 sBTTC 和 S_{sBI} 指标识别关键支路的一致性

在上述多机系统功角失稳的过程中,全网 500 kV 交流支路以及失步割集中 YM-HC、YC-FT、XL-LD 支路的 sBTTC 指标和支路垂足电压位置系数 ξ_v 如附录 B 图 B3 所示。由图可知:随着功角的摇摆,网络节点电压下降,全网支路的 sBTTC 指标均下降,但只有失步割集中的支路相位差才会达到并超过 180° , 即 sBTTC 指标才会出现零值;在全网支路中, YM-HC 始终具有最小的 sBTTC 指标值且其支路垂足电压位置系数 $\xi_v \in [1, 2]$, 因此该支路是系统中的关键支路。

在失步割集中, YM-HC、YC-FT、XL-LD 支路的有功功率、相位差、暂态势能以及 S_{sBI} 指标如附录 B 图 B4 所示。正向传输有功功率与持续增大的相位差积分使支路势能 V_{PE} 增大,在有功功率反向时 V_{PE} 达到最大值,对应的支路 S_{sBI} 指标达到零值,这表示系统失去功角稳定。在该过程中, YM-HC 支路的 S_{sBI} 指标最先达到零值,该支路是系统中的关键支路。

综合以上分析,在具有复杂网络拓扑结构的多机系统中,随着功角稳定水平的恶化,sBTTC指标和 S_{sSBI} 指标均单调递减,sBTTC由近似1.0趋近0, S_{sSBI} 则由 $+\infty$ 趋近0,两者具有不同的数值变化区间。基于关键支路相轨迹凹凸性的转换特征(如附录B图B5(a)所示),或基于EEAC法等值机穿越 $P_c-\delta$ 曲线不稳定平衡点的时刻(如附录B图B5(b)所示),确定临界稳定状态对应的sBTTC和 S_{sSBI} 指标大小,分别如图B3(b)和图B4(d)所示。经大量失稳样本的统计分析,分别确定sBTTC和 S_{sSBI} 临界指标大小,并据此设置2种指标的判稳门限值。

5 结论

在大扰动冲击后,网络电气量随着机组功角的摇摆波动而变化,单一电气量或多电气量的组合量中蕴含着功角稳定性信息。本文针对基于网络受扰响应的BTTC法和sBTTC指标以及支路暂态势能法和 S_{sSBI} 指标开展了关联性分析,具体结论如下。

1)提出了基于网络受扰响应构建表征功角稳定水平的指标通用范式,BTTC法的sBTTC指标和支路暂态势能法的 S_{sSBI} 指标是归属通用范式的2种不同实现形式。

2)提出了适用于响应式稳定分析与控制的 S_{sSBI} 指标简化策略,即 S_{sSBI} 指标。sBTTC指标和 S_{sSBI} 指标均随着稳定性的恶化而单调递减,且通过指标排序能够识别可表征系统功角稳定水平的关键支路。

3)依据随着稳定性单调递减的sBTTC、 S_{sSBI} 指标并结合相应门限值,或依据指标识别关键支路并结合其相轨迹凹凸性等特征,可启动紧急控制或解列控制。

4)sBTTC、 S_{sSBI} 指标变化区间和临界状态时的指标大小均具有差异。将2种指标联合应用,共同识别关键支路,并通过分别设定的判稳门限值联合判稳,可提高关键支路识别及稳定判别的可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 袁杨,张衡,程浩忠,等. 发输电系统鲁棒优化规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):10-19,85.
YUAN Yang, ZHANG Heng, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of robust optimization and planning research on generation and transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 10-19, 85.
- [3] 谢欢,张保会,李钢,等. 基于广域发电机状态信息的电力系统暂态不稳定性实时预测[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):28-32.
XIE Huan, ZHANG Baohui, LI Gang, et al. Real-time prediction of transient instability based on wide-area information of generator state[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 28-32.
- [4] 贾勇,何正友,廖凯. 基于广域时空随机响应的低频振荡模式辨识[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):50-56.
JIA Yong, HE Zhengyou, LIAO Kai. Low-frequency oscillation mode identification based on wide-area spatio-temporal stochastic responses[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 50-56.
- [5] 杨晨,余一平,樊陈,等. 基于已知激励响应的低频振荡信息在线辨识[J]. 电力自动化设备,2023,43(1):193-201.
YANG Chen, YU Yiping, FAN Chen, et al. Online identification of low-frequency oscillation information based on known excitation response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 193-201.
- [6] 蔡国伟,穆钢, K W Chan, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析:支路势能法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):1-6.
CAI Guowei, MU Gang, CHAN K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 1-6.
- [7] 刘友波,刘俊勇,王民昆,等. 计及动能注入系数的线路暂态脆弱性快速评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):40-47.
LIU Youbo, LIU Junyong, WANG Minkun, et al. Fast assessment method for transient vulnerability of transmission lines based on kinetic energy injection betweenness[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 40-47.
- [8] WANG L C, GIRGIS A A. A new method for power system transient instability detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1082-1089.
- [9] 方勇杰,崔晓丹. 暂态稳定视角下的强关联输电断面及其识别方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):75-82.
FANG Yongjie, CUI Xiaodan. Strong correlated transmission sections and their identification method from perspective of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 75-82.
- [10] CAI G W, CHAN K W, YUAN W P, et al. Identification of the vulnerable transmission segment and cluster of critical machines using line transient potential energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(3): 199-207.
- [11] 王科,游大海,尹项根,等. 基于支路势能脊的电力系统暂态稳定分析和临界割集识别[J]. 电工技术学报,2013,28(11):262-269.
WANG Ke, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. Power system transient stability analysis and critical cutset detection based on branch ridge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 262-269.
- [12] 刘斌,张宇驰,蔡国伟,等. 基于网络能量的高比例DFIG并网电力系统暂态稳定紧急控制[J]. 高电压技术,2022,48(8):3109-3118.
LIU Cheng, ZHANG Yuchi, CAI Guowei, et al. Transient stability emergency control of high proportion DFIG grid-connected power system based on network energy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3109-3118.
- [13] 杨濛濛,郭雷,王春华,等. 基于改进支路暂态势能函数的风电并网暂态最优切机控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(18):72-77.
YANG Mengmeng, GUO Lei, WANG Chunhua, et al. Transient optimal tripping control of grid-connected wind farms based on advanced branch transient energy function[J]. Power Sys-

- tem Protection and Control, 2014, 42(18): 72-77.
- [14] 杨松浩, 李秉芳, 赵天骐, 等. 新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 12-18.
YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 12-18.
- [15] 刘福锁, 方勇杰, 吴雪莲, 等. 基于相位角的失步解列判据在复杂场景下的适应性及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 71-75.
LIU Fusuo, FANG Yongjie, WU Xuelian, et al. Adaptability and countermeasures of splitting criterion based on phase angle in complex scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 71-75.
- [16] SUN K, HUR K, ZHANG P. A new unified scheme for controlled power system separation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1544-1554.
- [17] SO K H, HEO J Y, KIM C H, et al. Out-of-step detection algorithm using frequency deviation of voltage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 119-126.
- [18] TANG F, YANG J, LIAO Q F, et al. Out-of-step oscillation splitting criterion based on bus voltage frequency[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 341-352.
- [19] 郑超, 孙华东, 李惠玲. 基于响应的支路暂态输电能力指数及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 581-592.
ZHENG Chao, SUN Huadong, LI Huiling. Response-based branch transient transmission capability index and transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 581-592.
- [20] 郑超, 孙华东, 张爱军, 等. 基于广域支路响应的功角与电压主导稳定模式判别及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6148-6160.
ZHENG Chao, SUN Huadong, ZHANG Aijun, et al. Discrimination of rotor angle stability and voltage stability based on wide-area branch response and emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6148-6160.
- [21] 郑超, 孙华东, 陈怡君. 基于广域支路响应特征的失稳预判与紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5866-5877.
ZHENG Chao, SUN Huadong, CHEN Yijun. Instability pre-judge and emergency control based on the response characteristic of wide-area branches[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5866-5877.
- [22] 郑超, 孙华东, 邓嘉卿. 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.

作者简介:

郑超(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力电子应用技术(E-mail: 10395732@qq.com);

牛振波(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

吕思卓(1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力电子应用技术。

(编辑 王锦秀)

Association evaluation and analysis of BTTC method and branch transient potential energy method for power angle stability

ZHENG Chao, NIU Zhenbo, LÜ Sizhuo

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The disturbed information of network nodes and branches can be easily measured, which is suitable for response-based stability analysis and control scenarios. Aiming at the typical two-machine power transmission system, the spatial distribution and time-varying characteristics of the voltage phase for network nodes and the branch phase difference swaying with the power angle are analyzed, on this basis, the index normal form representing power angle stability level is constructed based on the network disturbed response. The consistency and difference between branch transient transmission capability (BTTC) method as well as BTTC index and branch transient potential energy method as well as branch stability measurement index are analyzed, and aiming at the application constraint bottleneck of branch stability measurement index, a practical simplification strategy is put forward. The simulation of AC/DC hybrid complex multi-machine system shows that the BTTC index and simplified branch stability measurement index have the properties such as monotonically decreasing with the deterioration of power angle stability and accurately locating key branches, the combination of the two can improve the reliability of response stability discrimination.

Key words: power angle stability; network disturbed response; BTTC; branch transient potential energy; stability index

附录 A

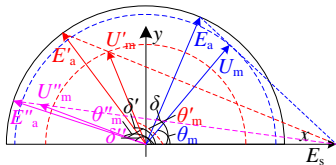


图 A1 典型两机功率传输系统电气量相量关系

Fig.A1 Electric quantity phasor relationship of power transmission system

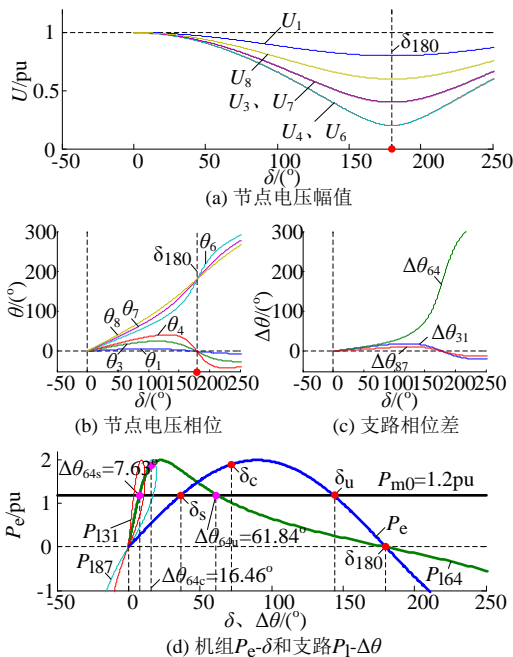


图 A2 随功角增大的支路相关电气量变化特征

Fig.A2 Characteristics of branch-related electrical quantities with increasing of δ

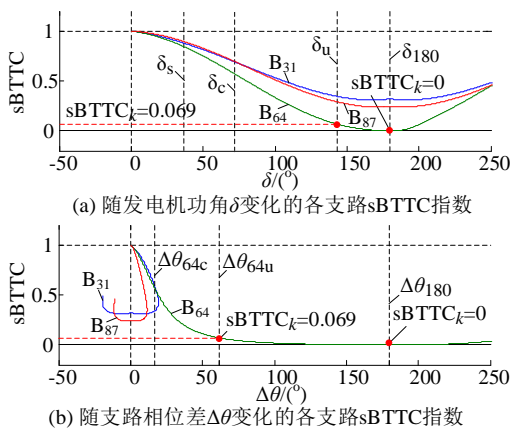


图 4 不同支路的 sBTTC 指标

Fig. 4 sBTTC index of different branch

图 A3 不同支路的 sBTTC 指标
Fig.A3 sBTTC index of different branches

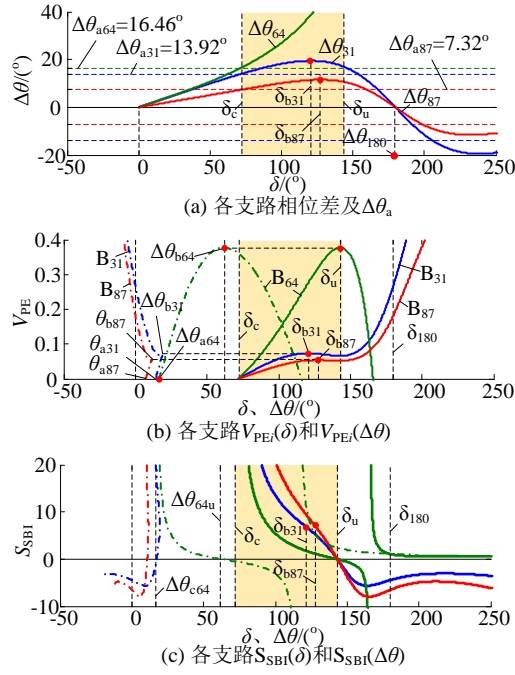


图 A4 不同支路相位差、势能及 S_{SBI} 指标

Fig.A4 Phase difference, potential energy and S_{SBI} index of different branches

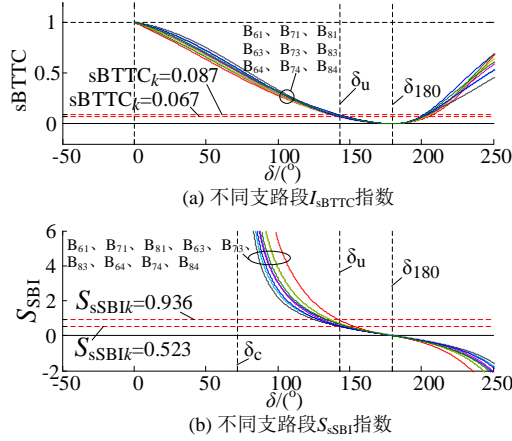


图 A5 跨越电气中点各支路 sBTTC 和 S_{SBI}

Fig.A5 sBTTC and S_{SBI} of different branches

附录 B

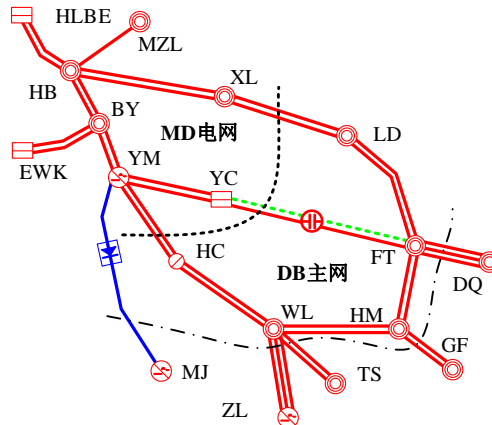


图 B1 局部交直流混联外送系统

Fig.B1 AC and HVDC hybrid sending power grid

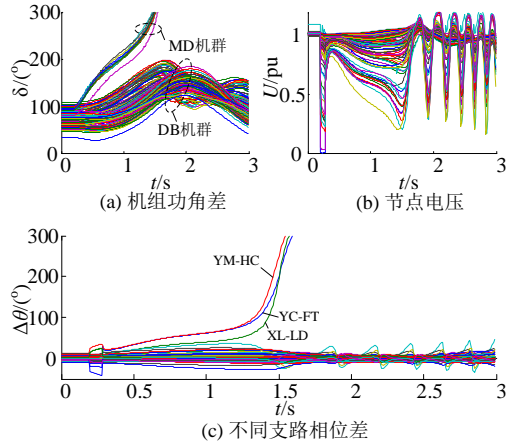


图 B2 DB 电网机组功角差和节点电压及相位差响应

Fig.B2 Transient response of rotor angle and voltage of DB power grid

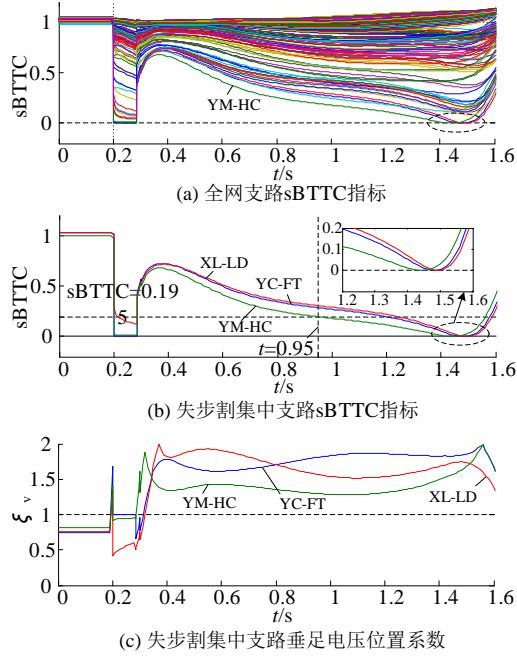
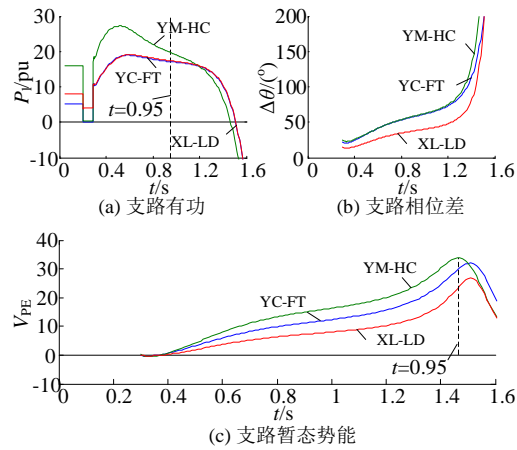
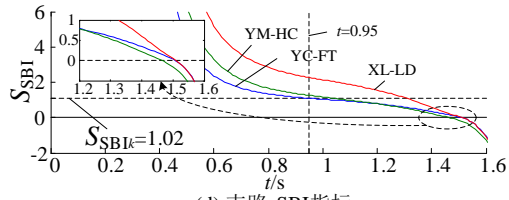


图 B3 失步断面中各支路电气量及 sBTTC 指标

Fig.B3 Electrical quantities and sBTTC index of branch in out-of-step cutset





(d) 支路 S_{SBI} 指标

图 B4 失步断面中各支路电气量及 S_{SBI} 指标

Fig.B4 Electrical quantities and S_{SBI} index of branch in out-of-step cutset

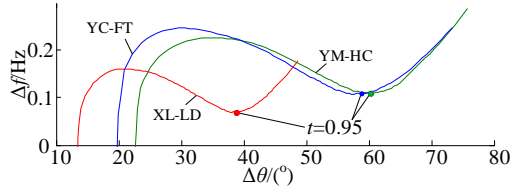


图 B5 关键支路相轨迹以及 EEAC 等值机 $P-\delta$ 曲线

Fig.B5 Phase trajectories of key branch and $P-\delta$ curve of equivalent generator