基于GGDF的割集断面潮流定向控制

为提高电网运行安全稳定性，提出一种基于GGDF的割集断面潮流定向控制方法。利用直流潮流模型中的GGDF得到各发电机对断面线路的灵敏度，根据断面潮流定向控制目标，在满足发电机可调量约束及线路冗余量约束的条件下，利用非线性优化得到断面潮流定向控制方案，对断面总潮流及断面各支路潮流实现定向控制。该方法克服了GSDF无法计算平衡机灵敏度的缺点，将平衡机参与到断面潮流定向控制中，提高了断面潮流控制准确度。在IEEE39节点系统中对该方法进行了验证。

徐　岩　郅　静/新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）

徐　岩/副教授

关键词/Keywords
电力系统·
断面潮流定向控制·
GGDF·

电力系统中，割集输电断面对断面两侧区域的电能传输发挥着重要作用[1-2]。当割集断面中部分线路的潮流接近其最大传输功率时，会导致线路故障概率增加及输电安全裕度降低等问题[3]。因此，通过调整系统中各发电机的发电量，对关键割集断面的潮流进行准确的定向控制，对提高断面传输能力和系统稳定性有重要作用。

文献[4]对断面支路进行潮流追踪确定发电机控制节点及相应的发电调整量，但潮流追踪计算复杂，并且该方法只对断面总潮流进行控制，无法满足断面中各支路潮流变动的不同目标；文献[5]利用发电转移分布因子（Generation Shift Distribution Factor，GSDF）计算断面潮流控制方案，实现断面总潮流和断面中各支路潮流不同的定向控制目标，但GSDF的计算以平衡机为参考节点，导致平衡机无法参与断面潮流控制，降低了断面潮流的控制准确度。

针对已有方法的缺点，提出一种基于广义发电分布因子（Generalized Generation Distribution Factor，GGDF）的割集断面潮流定向控制方法，利用直流潮流模型中的GGDF得到各发电机对断面线路的灵敏度，根据断面潮流定向控制目标，在满足发电机可调量约束及线路冗余量约束的条件下，利用非线性优化得到断面潮流定向控制方案，对断面总潮流及断面各支路潮流实现定向控制，在保证完成断面输电任务的同时提高断面的稳定性。该方法克服了GSDF无法计算平衡机灵敏度的缺点，将平衡机参与到断面潮流定向控制中，提高了断面潮流控制准确度。

断面潮流定向控制

电力系统中割集断面为一组支路集合，若将该集合中所有线路断开，系统将分为不可连通的两部分。

当断面输电任务增加时，优先将增加的功率分配到功率传输裕度较大的断面线路，可以在保证完成断面输电任务的同时提高系统的安全稳定水平。例如，某断面包括两条支路，潮流分别为[90 MW，10 MW]，支路最大传输功率均为100 MW，此时支路1的传输裕度为10 MW，支路2的传输裕度为90 MW，若令断面潮流增加50 MW，则将增加的50 MW全部由支路2承担能更有利于断面潮流均衡和系统稳定，此时断面潮流定向控制目标可制定为[0 MW，50 MW]。

国家自然科学基金（50777016），中央高校基本科研业务费专项资金（NO.12MS110）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

基于GGDF的割集断面潮流定向控制

1. GSDF

GSDF定义了节点单位注入功率变化引起的支路潮流的变化量[6-9]，当节点i注入有功变化ΔP_i时，支路k有功功率变化为ΔP_{k-i}，则节点i对支路k的发电转移分布因子A_{k-i}为

$$A_{k-i}=\frac{\Delta P_{k-i}}{\Delta P_i} \tag{1}$$

在直流潮流模型下，GSDF的计算公式为

$$A_{k-i}=\frac{M_k^{\mathrm{T}}X_i}{x_k} \tag{2}$$

式中，M_k^{T}为支路k的节点关联向量；X_i为直流潮流电纳矩阵$\boldsymbol{B}$的逆矩阵$\boldsymbol{X}$的第i个列向量；x_k为支路k的电抗。

GSDF将平衡机作为参考节点，A_{k-i}表示节点i增加单位注入功率，平衡机减少单位注入功率时支路k的有功增量。平衡机对电网中任意一条线路的GSDF值为0[10]，因此，平衡机无法参与割集断面潮流定向控制。

2. GGDF

为克服GSDF不能反映平衡机对线路潮流控制情况的缺点，文献[11]提出了GGDF的概念，其核心思想是假设支路有功功率是各发电机出力的线性函数，即

$$P_k=\sum_{i=1}^{n}D_{k-i}P_{\mathrm{G}i} \tag{3}$$

式中，P_k为线路k的有功潮流；n为发电机节点总数；$P_{\mathrm{G}i}$为发电机i的有功出力；D_{k-i}为发电机i对支路k的GGDF。

平衡机r对线路k的GGDF计算公式为

$$D_{k-r}=\frac{P_k-\sum_{p\neq r}A_{k-p}P_{\mathrm{G}p}}{\sum_{q}P_{\mathrm{G}q}} \tag{4}$$

式中，$P_{\mathrm{G}p}$、$P_{\mathrm{G}q}$分别为发电机节点p和q的有功功率；$\sum_{q}P_{\mathrm{G}q}$为包括平衡机r在内的所有发电机的发电量之和。

发电机i对线路k的GGDF计算公式为

$$D_{k-i}=A_{k-i}+D_{k-r} \tag{5}$$

根据式（4）和式（5），当发电机i增加单位出力时，线路k的有功增量为D_{k-i}。GGDF可以计算平衡机对线路的灵敏度，反映平衡机注入功率对线路功率的控制情况，令平衡机参与割集断面潮流定向控制。

3. 割集断面潮流定向控制目标及约束

设某电网共有m台发电机，对该电网中割集输电断面D进行潮流定向控制，设该断面将系统分为送端系统A与受端系统B两部分，其发电机集合分别为$\mathrm{G_A}$和$\mathrm{G_B}$，发电机编号为$\mathrm{G_A}=\{\mathrm{G}_1,\mathrm{G}_2,\cdots,\mathrm{G}_s\}$和$\mathrm{G_B}=\{\mathrm{G}_{s+1},\mathrm{G}_{s+2},\cdots,\mathrm{G}_m\}$。

（1）割集断面潮流定向控制目标

设断面D中线路总数为N，断面总潮流变化目标为P，断面中支路k潮流变化目标为P_k，满足$P=\sum_{k=1}^{N}P_k$。

设发电机节点i的发电调整量为$\Delta P_{i,\mathrm{G}}$，则根据式（3），各发电机调整发电量后，断面中支路k的潮流变化量$\Delta P_k=\sum_{i=1}^{m}D_{k-i}\Delta P_{i,\mathrm{G}}$，断面总潮流变化量$\Delta P=\sum_{k=1}^{N}\Delta P_{k,\mathrm{B}}$。

断面潮流定向控制的目标函数为

$$\min f=\sum_{k=1}^{N}(P-\Delta P)^2+(P_k-\Delta P_k)^2 \tag{6}$$

（2）割集断面潮流定向控制约束

1）发电机调控量约束。为满足割集断面两侧系统的功率平衡，若由送端系统A到受端系统B的断面潮流增加P，则满足$\sum_{i=1}^{s}\Delta P_{i,\mathrm{G}}=-\sum_{i=s+1}^{m}\Delta P_{i,\mathrm{G}}=P$；若由送端系统A到受端系统B的断面潮流减少$P$，则满足$-\sum_{i=1}^{s}\Delta P_{i,\mathrm{G}}=\sum_{i=s+1}^{m}\Delta P_{i,\mathrm{G}}=P$。

同时，发电机i的调整量$\Delta P_{i,\mathrm{G}}$受其发电可调量约束，即满足

$$P_{i,\mathrm{Gmin}}<P_{i,\mathrm{G}}+\Delta P_{i,\mathrm{G}}<P_{i,\mathrm{Gmax}} \tag{7}$$

式中，$P_{i,\mathrm{G}}$为发电机i当前的发电量；$P_{i,\mathrm{Gmin}}$、$P_{i,\mathrm{Gmax}}$分别为发电机i的最小发电量和最大发电量。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

需要说明的是，对于系统中的平衡机j，考虑平衡机在电网运行中需要担负调频任务以及平衡电网微小功率差额的任务[12]，计算其可增出力时要预留出一定裕度，即对于平衡机j需要满足的约束为

$$P_{j,\mathrm{Gmin}}-P_{j,\mathrm{G}}<\Delta P_{j,\mathrm{G}}<P_{j,\mathrm{Gmax}}-P_{\mathrm{y}}-P_{j,\mathrm{G}} \tag{8}$$

式中，P_{y}为平衡机预留裕度，取$P_{\mathrm{y}}=10$ MW，实际电网运行中可根据情况适当取值。

2）线路冗余量约束。进行割集断面潮流定向控制时，要保证系统中不出现线路过载。因此，对于任意不属于断面的线路l，需要满足

$$\begin{cases}\Delta P_{l,\mathrm{B}}=\sum_{i=1}^{m}D_{l-i}\Delta P_{i,\mathrm{G}}\\ \Delta P_{l,\mathrm{B}}<P_{l\max}-P_{l}\end{cases} \tag{9}$$

式中，$P_{l\max}$为线路l的最大传输功率；P_l为线路l的当前传输功率。

支路最大传输功率既受到热稳定功率极限的限制，也受到其后备保护整定值所对应的最小传输功率的限制，应将支路最大允许传输功率取为上述二者中的最小值[13]。将支路热稳定功率极限作为其最大传输功率，实际电网运行中依情况而定。

根据割集断面潮流定向控制目标，考虑发电机可调量约束及线路冗余量约束，利用非线性优化方法即可得到断面潮流定向控制方案。

仿真算例

为验证平衡机参与割集断面潮流定向控制在控制准确度上的优势，在IEEE39节点系统中选取文献[4-5]中的割集断面D进行控制。该系统接线图及断面D如图1所示。

正常运行时各发电机有功功率发电情况如表1所示，令各发电机的最小发电量为0 MW，实际电网运行中依情况而定。IEEE39节点系统中节点31是平衡机，计算该发电机可增出力量时要留出一定裕度，取平衡机预留裕度为10 MW，实际电网运行中可根据情况适当取值。

正常运行情况时，断面D总传输功率为813.19 MW，其中断面线路17－27、17－18、14－4和11－6传输的功率分别为13.56 MW、192.40 MW、262.74 MW和344.49 MW。

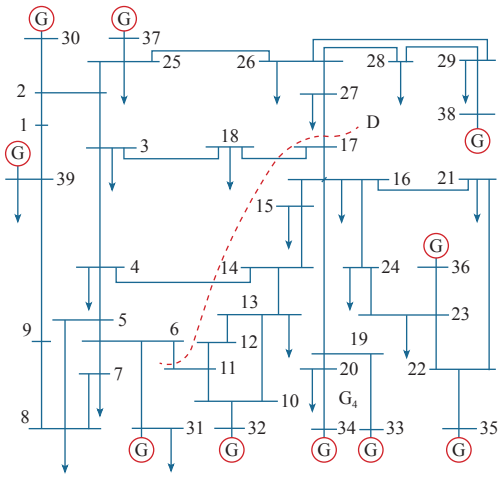

图1 IEEE39节点系统

表1 正常运行时各发电机发电情况

发电机编号	发电量/MW	最大发电量/MW	可增出力量/MW
30	250	1 040	790
31	572.83	646	63.17
32	650	725	75
33	632	652	20
34	508	508	0
35	650	687	37
36	560	580	20
37	540	564	24
38	830	865	35
39	1 000	1 100	100

令断面D总潮流增加40 MW，其中线路17－27潮流增加30 MW，线路17－18潮流增加10 MW，线路14－4和11－6潮流不变。分别利用本文方法和文献[5]方法得到发电机控制节点及相应的调整量，在PSASP软件中进行潮流计算，得到发电机调控后断面总功率及断面各支路功率，发电机调控方案以及对断面功率的控制结果如表2、表3所示。

表2 发电机调整量

发电机	发电机调整量/MW		发电机	发电机调整量/MW	
编号	本文方法	文献[5]方法	编号	本文方法	文献[5] 方法
30	36.49	0	35	37	13.34
31	－49.37	无	36	20	13.34
32	－37	0	37	16.36	0
33	20	13.34	38	－59.21	－40
34	0	0	39	15.73	0

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表3 断面D潮流增加40 MW时的控制结果

线路	控制目标/MW	本文控制结果			文献[5]控制结果		
		线路功率/MW	功率变化/MW	误差/MW	线路功率/MW	功率变化/MW	误差/MW
17－27	30	42.17	28.61	－1.39	39.29	25.73	－4.27
17－18	10	201.71	9.31	－0.69	197.88	5.48	－4.52
14－4	0	263.39	0.65	0.65	267.51	4.77	4.77
11－6	0	344.47	－0.02	－0.02	346.65	2.16	2.16
总计	40	851.74	38.55	－1.45	851.33	38.14	－1.86

从表3可知，本文方法在断面总潮流及断面各支路潮流的控制准确度上都要优于文献[5]中方法，其中在断面各支路的潮流定向控制上优势更加明显。

利用本文方法可以计算得到平衡机对断面线路的灵敏度，衡量平衡机功率变化对断面线路功率变化的影响，使平衡机参与到割集断面潮流定向控制中，提高了断面潮流控制准确度。

结束语

提出一种基于GGDF的割集断面潮流定向控制方法。利用GGDF计算各发电机对断面线路的灵敏度，根据断面潮流定向控制目标，在满足发电机可调量约束及线路冗余量约束的条件下，利用非线性优化得到断面潮流定向控制方案，对断面总潮流及断面各支路潮流实现定向控制。该方法克服了GSDF无法计算平衡机灵敏度的缺点，将平衡机参与到断面潮流定向控制中，提高了断面潮流控制准确度。

参考文献

[1] 罗钢，陈金富，石东源，等．基于复杂网络理论的关键输电断面分析 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (25)：147-155．

[2] 赵峰，孙宏斌，张伯明．基于电气分区的输电断面及其自动发现 [J]．电力系统自动化，2011，35 (5)：42-46．

[3] 钟贵和，王星华，甘德树，等．输电断面的有功安全预防－校正负荷调整算法 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (16)：15-20．

[4] 赵金利，赵晶，贾宏杰，等．基于潮流追踪和机组再调度的割集断面功率控制方法 [J]．电力系统自动化，2009，33 (6)：16-20．

[5] 贾宏杰，穆云飞，余晓丹．基于直流潮流灵敏度的断面潮流定向控制 [J]．电力系统自动化，2010，34 (2)：34-38．

[6] 沈瑜，夏清，康重庆．发电联合转移分布因子及快速静态安全校核算法 [J]．电力系统自动化，2003，27 (18)：13-17．

[7] 童星，康重庆，陈启鑫，等．虚拟母线技术及其应用 (一)：虚拟母线辨识算法 [J]．中国电机工程学报，2014，34 (4)：596-604．

[8] 於益军，刘俊，冯树海，等．基于开断灵敏度的静态安全分析辅助决策 [J]．中国电力，2013，46 (3)：53-58．

[9] 张剑云，孙元章．基于脆弱割集选择紧急控制地点的灵敏度分析方法 [J]．电网技术，2007，31 (11)：21-26．

[10] 邓佑满，黎辉，张伯明，等．电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法 [J]．电力系统自动化，1999，23 (18)：5-8．

[11] Wai Y N．Generalized generation distribution factors for power system security evaluations [J]．IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems，1981，100 (3)：1001-1005．

[12] 任建文，李莎，严敏敏，等．基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略 [J]．电网技术，2013，37 (2)：392-397．

[13] 杨文辉．预防连锁跳闸的关键线路后备保护与紧急控制策略研究 [D]．北京：华北电力大学，2012．

（收稿日期：2015－05－03）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net