

用于发电权交易安全校核的发电机有功功率线性分布因子算法

艾东平, 鲍海, 杨以涵

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 根据电路的基本理论, 在一定假设条件下推导得出发电机有功输出功率与其在输电线路上的功率份额近似呈线性关系。针对用于发电权交易的线路潮流安全校核的灵敏度法计算精度不高的问题, 采用最小二乘拟合技术求得具有统计意义的发电机有功输出功率线性分布因子。与基于灵敏度方法求得的功率分布因子相比, 所提方法计及了有功和无功潮流的耦合。IEEE 3 机 9 节点系统的分析结果表明, 当发电机出力在额定范围内进行较大调整时, 依照该因子进行线路潮流的快速计算更加精确。

关键词: 电力市场; 发电权交易; 功率份额; 发电机有功输出功率线性分布因子; 灵敏度因子; 最小二乘拟合

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0042-05

0 引言

发电权交易^[1]的进行会引起线路潮流的变化, 并可能产生新的安全问题, 所以执行前必须进行线路潮流的安全校核。现有的考虑潮流约束的发电权交易模型多采用撮合方式建立, 要求对每次的撮合结果进行安全校核, 如有线路潮流发生越限, 则需要重新调整交易量或取消交易^[2-7]。在线路潮流的快速安全校核方面, 基于灵敏度法的功率分布因子因其简单、快速而得到广泛研究与应用^[8-15], 其网络模型主要有直流模型和交流模型 2 种。例如, 常用的发电机输出功率转移分布因子(GSDF)就是基于平衡机假设条件下发电输出功率变化对线路潮流改变量的灵敏度, 利用调整前系统的有功潮流分布求出调整后的直流潮流分布^[10-13]。直流灵敏度计算简单、快速, 但计算精度较低; 而基于交流潮流获得的有功功率分布因子在运行点处则具有较高精度^[14-15]。

本文在研究这类问题时, 首先基于电路基本理论, 在一定的假设条件下推导出发电机有功输出功率与其在线路上的功率份额的线性关系, 在此基础上采用最小二乘拟合技术求取具有统计意义的发电机有功输出功率线性分布因子。该方法计及了有功和无功潮流的耦合关系, 与现有的灵敏度方法相比, 提高了线路潮流的计算精度。最后采用 IEEE 3 机 9 节点系统进行了验证。

1 发电机有功输出功率在线路上的功率份额呈线性分布的数学分析

1.1 发电机有功输出功率在线路上的功率份额

对于 n 个节点的电力网络, 设网络中有 q 个电源,

电源节点编号为 $1, 2, \dots, q$, 其后的节点编号次序任意。潮流计算后电网络可以等效成电路, 其中电源以电流源描述, 记为 $I_{ks} (k=1, 2, \dots, q)$, 则电网络的节点电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1q} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2q} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{q1} & Y_{q2} & \dots & Y_{qq} & \dots & Y_{qn} \\ Y_{(q+1)1} & Y_{(q+1)2} & \dots & Y_{(q+1)q} & \dots & Y_{(q+1)n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nq} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_q \\ U_{(q+1)} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1s} \\ I_{2s} \\ \vdots \\ I_{qs} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

简化为

$$YU=I_s \quad (1)$$

可以得出:

$$U_i = \sum_{k=1}^q Z_{ik} I_{ks} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中, Z_{ik} 是阻抗矩阵 $Z=Y^{-1}$ 中的元素。这样线路 ij 上的功率可以表示为

$$S_{ij} = U_i I_{ij}^* = U_i \left(\frac{U_i - U_j}{z_{ij}} \right)^* = \frac{1}{z_{ij}^*} [(Z_{i1} - Z_{j1})I_{1s} + (Z_{i2} - Z_{j2})I_{2s} + \dots + (Z_{iq} - Z_{jq})I_{qs}]^* \times (Z_{i1}I_{1s} + Z_{i2}I_{2s} + \dots + Z_{iq}I_{qs}) = \frac{1}{z_{ij}^*} [Z_{i1}(Z_{i1} - Z_{j1})^* I_{1s}I_{1s}^* + \dots + Z_{iq}(Z_{i1} - Z_{j1})^* I_{qs}I_{1s}^* + Z_{i1}(Z_{i2} - Z_{j2})^* I_{1s}I_{2s}^* + \dots + Z_{iq}(Z_{i2} - Z_{j2})^* I_{qs}I_{2s}^* + \dots + Z_{i1}(Z_{iq} - Z_{jq})^* I_{1s}I_{qs}^* + \dots + Z_{iq}(Z_{iq} - Z_{jq})^* I_{qs}I_{qs}^*] \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

表达式中除含有 $I_{ks}I_{ks}^*$ 形式的功率成分以外, 还含有 $I_{is}I_{ks}^* (i \neq k)$ 形式的功率成分, 将含有形如 $I_{is}I_{ks}^* (i, k \leq q)$ 的分量定义为由电源 k 对线路 ij 上潮流的

贡献份额^[16]。因此,电源 k 在线路 ij 上的有功功率份额 $P_{ij,k}$ 可表示为

$$P_{ij,k} = \operatorname{Re}(S_{ij,k}) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{z_{ij}^*} [Z_{i1}(Z_{ik} - Z_{jk})^* I_{1s} I_{ks}^* + \dots + Z_{iq}(Z_{ik} - Z_{jk})^* I_{qs} I_{ks}^*] \right\} \quad (4)$$

各发电机有功功率份额之和则为线路 ij 上的总功率:

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^q P_{ij,k} \quad (5)$$

1.2 数学分析

为获得发电机有功出力与线路潮流的直接联系,将式(4)重新整理可得:

$$P_{ij,k} = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* (Z_{i1} I_{1s} + \dots + Z_{iq} I_{qs}) I_{ks}^* \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* U_i I_{ks}^* \right] \quad (6)$$

其中电流源可表示为

$$I_{ks}^* = \frac{P_{ks} + jQ_{ks}}{U_{ks}}$$

代入式(6)得:

$$P_{ij,k} = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* U_i \frac{P_{ks} + jQ_{ks}}{U_{ks}} \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_i}{U_{ks}} (P_{ks} + jQ_{ks}) \right] \quad (7)$$

将式(7)在 $(U_{i0}, U_{ks0}, P_{ks0}, Q_{ks0})$ 处根据 Taylor 公式展开并略去高次项,可得:

$$\begin{aligned} P_{ij,k}(U_{i0} + \Delta U_i, U_{ks0} + \Delta U_{ks}, P_{ks0} + \Delta P_{ks}, Q_{ks0} + \Delta Q_{ks}) = & P_{ij,k}(U_{i0}, U_{ks0}, P_{ks0}, Q_{ks0}) + \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{P_{ks0} + jQ_{ks0}}{U_{ks0}} \Delta U_i \right] - \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}^2} (P_{ks0} + jQ_{ks0}) \Delta U_{ks} \right] + \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (\Delta P_{ks} + j\Delta Q_{ks}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

因此有

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij,k} = & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (\Delta P_{ks} + j\Delta Q_{ks}) \right] + \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{P_{ks0} + jQ_{ks0}}{U_{ks0}} \left(\Delta U_i - \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} \Delta U_{ks} \right) \right] = \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (\Delta P_{ks} + j\Delta Q_{ks}) + \right. \\ & \left. \delta(\Delta U_i, \Delta U_{ks}) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)是以 $(U_{i0}, U_{ks0}, P_{ks0}, Q_{ks0})$ 为初始状态获得的发电机有功输出功率与其在线路上的功率份额的近似增量关系。设 (P'_{ks}, Q'_{ks}) 为发电机出力调整后的输出功率,根据式(9)有

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij,k} = & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} [(P'_{ks} - P_{ks0}) + \right. \\ & \left. j(Q'_{ks} - Q_{ks0})] + \delta(\Delta U_i, \Delta U_{ks}) \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (P'_{ks} + jQ'_{ks}) \right] - \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (P_{ks0} + jQ_{ks0}) \right] + \\ & \operatorname{Re}[\delta(\Delta U_i, \Delta U_{ks})] = \\ & \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (P'_{ks} + jQ'_{ks}) \right] - \\ & P_{ij,k0} + \operatorname{Re}[\delta(\Delta U_i, \Delta U_{ks})] \end{aligned} \quad (10)$$

所以有

$$P'_{ij,k} = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} (P'_{ks} + jQ'_{ks}) \right] + \operatorname{Re}[\delta(\Delta U_i, \Delta U_{ks})] \quad (11)$$

根据计算需要,采用以下假设对上述模型进行简化处理^[17]:

a. 发电机无功可用发电机有功线性表示为 $Q_{ks} = f_k P_{ks} + Q_{ks0}$;

b. 发电机有功出力调整过程中,系统各个节点电压不变,则 $\operatorname{Re}[\delta(\Delta U_i, \Delta U_{ks})] \approx 0$;

c. 发电机出力调整过程中,视负荷功率不变。

若设 $\frac{1}{z_{ij}^*} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \frac{U_{i0}}{U_{ks0}} = m_{k0} + jn_{k0}$, 则根据上述假设条件,式(11)可写为

$$P'_{ij,k} = \operatorname{Re} \{ (m_{k0} + jn_{k0}) [P'_{ks} + j(f_k P'_{ks} + Q_{ks0})] \} = (m_{k0} - f_k n_{k0}) P'_{ks} - n_{k0} Q_{ks0} \quad (12)$$

将上述关系用一般线性表达式表示为

$$P'_{ij,k} = a_{ij,k} P_{ks} + b_{ij,k} \quad (13)$$

其中, $a_{ij,k}$ 、 $b_{ij,k}$ 为常数,定义为发电机 k 在线路 ij 上的有功功率线性分布因子。

上述推导证明,在一定假设条件下,发电机有功输出功率与其在线路上的功率份额近似成线性关系。定义的线性分布因子 $a_{ij,k}$ 、 $b_{ij,k}$ 不仅与网络结构、支路参数有关,还与系统的运行状态有关。只要假设条件不遭到很大破坏,这种线性关系都能得到很好的满足。

将式(13)代入式(5),则线路 ij 上总的有功功率可以表示为

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^q P_{ij,k} = \sum_{k=1}^q (a_{ij,k} P_{ks} + b_{ij,k}) \quad (14)$$

当 $a_{ij,k}$ 、 $b_{ij,k}$ 确定后,在调整发电机有功功率时即可根据此式进行线路潮流的快速计算。

2 基于最小二乘拟合技术的发电机有功输出功率线性分布因子

第 1 节在一定假设条件下获得了发电机有功输出功率在线路上线性分布的数学表现形式,定义了具有物理含义的发电机有功输出功率线性分布因子,但因模型误差和计算误差的存在,采用某一潮流断面确定的线性分布因子并不能准确地表示发电机有功输出功率变化过程中该发电机在线路上的功率份额的分布情况,为获得最佳线性分布因子,采用具

有统计意义的最小二乘拟合技术^[18-19]。

最小二乘拟合的几何意义是使给定数据集 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ 内的点与对应点 $\{(x_i, f(x_i))\}_{i=1}^n$ 的距离 δ_i 的平方和最小,即

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 \quad (15)$$

其中, $f(x_i) = ax_i + b$ 。为使上式达到最小,需满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

解上面方程可得:

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n (x_i y_i) \sum_{i=1}^n x_i}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \end{cases} \quad (17)$$

根据上述方法,本文首先给出发电机 k 可调范围内 n 组有功输出功率,经潮流计算,利用式(4)得到该发电机有功输出功率在线路 ij 上精确的功率份额,形成数据集 $\{(P_{ks}^i, P_{ij,k}^i)\}_{i=1}^n$,然后即可根据式(17)求出拟合的线性分布因子 $a_{ij,k}$ 、 $b_{ij,k}$ 。

利用最小二乘拟合技术求取的线性分布因子是根据真实潮流获得的,考虑了有功和无功潮流的耦合关系,更真实地反映了发电机有功输出功率在线路上的分布情况,从算例分析中可以看到,当调整发电机有功输出功率时,用该分布因子进行线路潮流的快速计算可以获得较高精度。

3 发电权交易线路潮流快速安全校核步骤

发电权交易线路潮流快速安全校核步骤为下述 4 步。

a. 根据发电权交易前的负荷水平对系统中参与发电权交易的 m 台机组给出 n 个功率分配方案,分别计算各个分配方案下的线路潮流,并根据式(4)计算每台发电机在每条线路上的功率份额,形成数据集 $\{(P_{ks}^i, P_{ij,k}^i)\}_{i=1}^n (k=1, \dots, m)$ 。

b. 每条线路对每台机组使用上述形成的数据集按最小二乘法计算分布因子 $a_{ij,k}$ 、 $b_{ij,k}$ 。

c. 开始发电权交易模型的求解后,每一个撮合结果将确定一组新的机组功率输出方案,根据式(14)计算新的机组功率输出方案下的线路潮流,如有线路越限,则调整交易量或取消交易直至越限情况消除。

d. 发电权交易撮合过程中不断重复步骤 **c**,直至撮合交易结束。

步骤 **a**、**b** 属于线路潮流安全校核的准备阶段,由于发电权交易多为日以上时序交易^[5,7],所以可以在发电权交易撮合前完成,并不影响对发电权交易

模型的求解速度。在线路潮流的快速安全校核过程中,基于式(13)的线路潮流计算为线性计算,所以可以保证和基于灵敏度因子的线路潮流计算具有相当的计算速度。

上述计算可以作为线路潮流安全校核子模块嵌入发电权撮合交易程序中,易于实现。

4 算例分析

4.1 发电机有功输出功率与其在线路上的功率份额呈线性关系的验证

本文以 IEEE 3 机 9 节点系统为例,首先考察发电机有功输出功率与其在线路上的功率份额的近似线性关系。系统结构如图 1 所示。节点 1 为平衡节点,恒定有功负荷按编号次序分别为 125 MW、90 MW、100 MW。

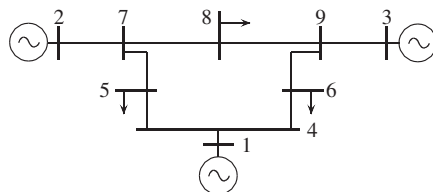


图 1 IEEE 3 机 9 节点系统

Fig.1 IEEE 3-generator 9-bus system

在网络拓扑结构不变、系统无功充足且稳定运行的前提下,调整发电机的出力且各机组出力都在额定范围内。经潮流计算后得出 16 组机组有功输出功率的数据,如表 1 所示。

表 1 发电机有功输出功率

Tab.1 Active power outputs of generators MW

组别	P_1	P_2	P_3	组别	P_1	P_2	P_3
1	60.911	170	90	9	70.491	170	80
2	28.066	195	100	10	70.433	165	85
3	42.072	185	95	11	72.333	163	85
4	99.297	150	70	12	80.005	160	80
5	158.365	120	40	13	89.626	155	75
6	32.702	190	100	14	148.395	125	45
7	51.495	180	90	15	158.304	115	45
8	60.968	175	85	16	188.413	90	40

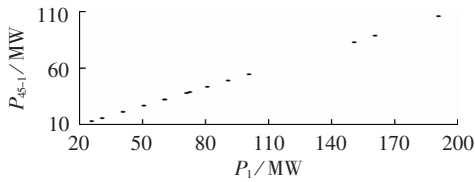
以线路 L_{45} 为例,具体结果如表 2 所示。表 2 所列数据可以认为是发电机输出功率在线路 L_{45} 上的功率份额的真值。

表 2 各台发电机在线路 L_{45} 上的功率份额

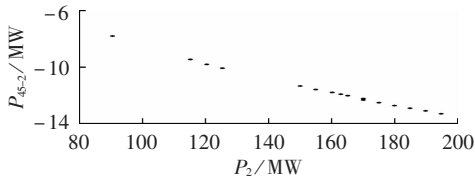
Tab.2 Power contribution of generators to line L_{45} MW

组别	P_{45-1}	P_{45-2}	P_{45-3}	组别	P_{45-1}	P_{45-2}	P_{45-3}
1	32.211	-12.255	15.602	9	37.811	-12.343	13.667
2	12.930	-13.323	17.645	10	37.779	-12.046	14.612
3	21.165	-12.926	16.635	11	38.889	-11.944	14.603
4	54.606	-11.377	11.638	12	43.368	-11.830	13.621
5	88.812	-9.857	5.657	13	48.976	-11.607	12.630
6	15.657	-13.106	17.623	14	83.059	-10.128	6.658
7	26.693	-12.739	15.646	15	88.780	-9.497	6.586
8	32.242	-12.544	14.657	16	106.120	-7.870	5.401

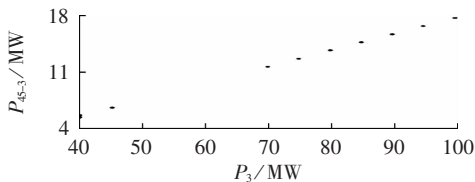
将表 1 和表 2 相关数据列于直角坐标图上,可直观地看出各发电机有功输出功率在线路 L_{45} 上的功率份额的分布情况,如图 2 所示。



(a) 1号发电机的有功输出功率在 L_{45} 上的功率份额的分布图



(b) 2号发电机的有功输出功率在 L_{45} 上的功率份额的分布图



(c) 3号发电机的有功输出功率在 L_{45} 上的功率份额的分布图

图 2 发电机有功出力在线路 L_{45} 上的功率份额分布

Fig.2 Active power contribution of generators to line L_{45}

从图 2 所示的关系可见,发电机有功输出功率与其在线路上的功率份额近似呈线性关系,验证了 2.2 节的分析。

4.2 线路潮流的快速计算及误差比较

基态潮流由表 1 提供的第 1 组数据确定,采用第 6 组和第 16 组数据作为发电机有功出力的调整方案。2 种调整方案中发电机最大调整量分别为 30 MW 和 130 MW。

表 3 和表 4 列出了 2 种调整方案下不同方法(A、B、C、D)求得的各项线路潮流值并与方法 A 比较计算精度。其中 A、B、C、D 分别为采用牛拉法、发电机输出功率转移分布因子(GSDF)法、交流灵敏度因子法以及本文提出的计算方法。将采用牛拉法求得

表 3 发电机有功出力调整方案 1 下的各条线路潮流

Tab.3 Line power flows of active power output adjustment scheme 1

始 终 点	潮流计算值/MW				误差/%		
	A	B	C	D	B	C	D
2 7	190.000	190.000	190.000	190.000	0	0	0
7 8	80.995	80.810	80.973	81.040	0.228	0.027	0.078
9 8	20.009	20.151	20.027	20.109	-0.708	-0.092	-0.368
3 9	100.000	100.000	100.000	100.000	0	0	0
7 5	109.005	109.190	109.030	108.970	-0.169	-0.020	0.013
9 6	79.991	79.849	79.973	79.904	0.177	0.023	0.296
4 5	20.177	18.937	20.031	20.197	6.144	0.725	0.332
4 6	12.525	11.974	12.441	12.515	4.402	0.673	0.211
1 4	32.702	30.911	32.476	32.702	5.476	0.691	0.253

表 4 发电机有功出力调整方案 2 下的各条线路潮流

Tab.4 Line power flows of active power output adjustment scheme 2

始 终 点	潮流计算值/MW				误差/%		
	A	B	C	D	B	C	D
2 7	90.000	90.000	90.000	90.000	0	0	0
7 8	67.322	67.767	67.048	67.767	-0.661	0.406	0.274
9 8	33.559	33.194	33.788	33.194	1.087	-0.682	-1.045
3 9	40.000	40.000	39.996	40.000	0	0	0
7 5	22.678	22.233	22.952	22.233	1.961	-1.206	0.066
9 6	6.442	6.806	6.212	6.806	-5.647	3.571	2.685
4 5	103.652	105.894	101.241	105.894	-2.163	2.326	1.003
4 6	84.761	85.0172	82.977	85.017	-0.302	2.105	0.726
1 4	188.413	190.911	184.199	190.911	-1.326	2.236	0.815

的线路潮流值作为潮流真值。

从上表数据结果可以看出,B、C、D 3 种方法求得的线路潮流值与方法 A 求得的线路潮流真值相比都存在不同程度的误差。

方法 B 属于直流网络模型下的灵敏度计算。直流潮流计算没有收敛性问题,但计算精度不高。对于超高压电网其计算误差在 3%~10%,因此,依据 GSDF 法计算线路潮流只能应用在精度要求不高的情况下^[1],本文算例中线路潮流最大相对误差达 6.144%。

方法 C 属于交流网络模型下的灵敏度计算。交流潮流灵敏度因子是在系统运行点处进行线性化计算得到的,从算例所列数据可以看出,使用交流灵敏度因子进行线路潮流计算在系统运行点处具有较高精度,但当发电机有功输出功率发生较大调整时,多条线路潮流计算值相对误差增大,本文所列数据中最大相对误差为 3.571%。

本文在假设条件下得出发电机有功输出功率与其线路上的功率份额的线性关系服从 $y=ax+b$ 的形式,基于实际潮流采用最小二乘拟合技术获得的分布因子,更真实地反映了线路潮流的分布情况,在相同的系统运行工况下,线路潮流计算精度高于灵敏度因子,最大相对误差为 2.685%。

该方法经 IEEE 14、IEEE 39 节点系统验证,同样可以获得较高的计算精度。

5 结论

a. 基于电路基本理论,在一定假设条件下揭示了系统在网络拓扑结构不变、负荷恒定、无功充足的情况下,发电机有功输出功率在线路上的功率份额近似呈线性分布的规律,并获得了该线性分布的数学表达式。

b. 根据上述规律,本文采用具有统计意义的最小二乘拟合技术,利用实际的潮流数据求取发电机有功输出功率线性分布因子。算例表明,由于该因子计及了有功和无功潮流之间的耦合,所以在相同运行工况下与灵敏度因子相比,提高了线路潮流的计算精度。

c. 所提方法为发电权交易线路潮流的快速安全校核提供了一个新的途径。

参考文献:

- [1] 国家电力监管委员会. 发电权交易监管暂行办法[EB/OL]. [2008-03-27]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1205399.htm.
- [2] 黎灿兵,康重庆,夏清,等. 发电权交易及其机理分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):13-18.
LI Canbing,KANG Chongqing,XIA Qing,et al. Generation rights trade and its mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(6):13-18.
- [3] 王雁凌,张粒子,杨以涵. 基于水火电置换的发电权调节市场[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):131-136.
WANG Yanling,ZHANG Lizi,YANG Yihan. Adjusting market of generation rights based on hydro-thermal exchange[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):131-136.
- [4] WANG Yanling,ZHANG Lizi. Design trading market of generation rights[C]//IPEC 2005. Singapore:[s.n.],2005:842-847.
- [5] 陈启鑫,康重庆,程旭东,等. 考虑阻塞管理的发电权交易模型及其网络流算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):106-111.
CHEN Qixin,KANG Chongqing,CHENG Xudong,et al. Generation rights trade model and its network flow algorithm considering congestion management[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):106-111.
- [6] 肖建,文福拴. 发电权交易的阻塞调度[J]. 电力系统自动化,2008,32(18):24-29.
XIAO Jian,WEN Fushuan. Congestion dispatch for generation rights trade[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(18):24-29.
- [7] 尚金成. 基于节能减排的发电权交易理论及应用(一)发电权交易理论[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):46-52.
SHANG Jincheng. Generation right exchange theory and its applications based on energy-saving and emission reducing part one generation right exchange theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(12):46-52.
- [8] 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.
SHEN Yu,XIA Qing,KANG Chongqing. Generation Jointly Shift Distribution Factor(GJSDF) and fast security analysis algorithm in economic dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):13-17.
- [9] 沈瑜,夏清,江健健,等. 电力市场短期交易计划新模型及其求解策略研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(18):12-16.
SHEN Yu,XIA Qing,JIANG Jianjian,et al. A novel modal of short-term planning in a deregulated power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(18):12-16.
- [10] WOOD A J,WOLLENBERG B F. Power generation,operation and control[M]. New York,USA:Wiley,1996:410-452.
- [11] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2007:210-217.
- [12] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985:64-66.
- [13] NG W Y. Generalized generation distribution factors for power system security evaluations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,1983,102(9):1001-1005.
- [14] 华科,谢开,郭志忠. 基于交流灵敏度的电能交易与输电权的统一拍卖[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):47-50.
HUA Ke,XIE Kai,GUO Zhizhong. A joint auction of energy and transmission rights based on AC sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):47-50.
- [15] CHEN S T,HUANG W T,LAI W T,et al. Power system fast line flow calculation for security control by sensitivity factors [C]//Proceeding of the Second International Conference on Innovative Computing,Information and Control. Kumamoto, Japan:IEEE Computer Society,2007:385-388.
- [16] 鲍海,马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报,2005,25(21):82-86.
BAO Hai,MA Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power system[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(21):82-86.
- [17] 李文沅. 电力系统安全经济运行——模型与方法[M]. 重庆:重庆大学出版社,1989:37-38.
- [18] BURDEN R L,FAIRES D. 数值分析[M]. 7版. 北京:高等教育出版社,2005:432-440.
- [19] 任玉杰. 数值分析及其 Matlab 实现[M]. 北京:高等教育出版社,2007:481-489.

(实习编辑:李莉)

作者简介:

艾东平(1981-),男,吉林白城人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:dongping19810127@126.com);

鲍海(1968-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制;

杨以涵(1927-),男,辽宁铁岭人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制。

Algorithm of generation linear distribution factors for security analysis of generation rights trade

AI Dongping,BAO Hai,YANG Yihan

(School of Electric Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: According to the circuit theory and some reasonable assumptions,the approximate linear relationship between generation and its components is deduced. As the precision of sensitivity method applied for the security check of generation rights trade is low,the least square fitting technique is used to calculate the statistically significant generation linear distribution factors. Compared with the sensitivity method,the proposed method considers the coupling between active and reactive power flows. Analytical results of IEEE 3-generator 9-bus system show that,when the generation output is adjusted greatly in a rated scale,the proposed method is more accurate.

Key words: electricity market; generation rights trade; power components; generation linear distribution factors; sensitivity factors; least-square fitting