

DOI: 10.7667/PSPC151633

基于功率传输转移分布因子的简化电网潮流计算方法

殷自力, 陈宇星

(国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 为了减少大型电力系统的潮流计算时间, 研究简化电网的潮流计算方法具有重要意义。现有方法将传统 Ward 等值技术用于电网简化后, 简化电网却产生与原始电网不同的潮流结果。针对这种情况, 提出了一种改进的简化电网的直流潮流计算方法。在已有研究的基础上, 给出了基于功率转移分布因子的直流潮流算法以及使用 Ward 技术对电网的简化方法。结合上述两部分, 给出了基于功率转移分布因子的简化电网潮流计算方法。通过仿真算例表明, 所得的结果具有较高的精度, 可用于简化大型电网的潮流计算、潮流预报等应用中。

关键词: 功率转移分布因子; 简化电网; 直流潮流; Ward; 潮流预报

A power flow computation method for reduction grid based on power transfer distribution factor

YIN Zili, CHEN Yuxing

(Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to reduce the time of large power system power flow computation, the study of power flow computation method for reducing power grid is much more significant. But, the existing method of Ward is used to the reduce grid and different result as the original grid is got. Aiming at this condition, an improved DC power flow computation method is presented in reduced power system. Based on the basis of present study results, the DC power flow computation method based on power transfer distribution factor is deduced. The Ward technology is used to reduce the power grid. Combining with the two parts, the power flow computation method for reduction grid based on power transfer distribution factor is given. Simulation results show that experimental result has high precision, and it can be applied in the power flow computation for the reduced power grid and power flow forecast and so on.

Key words: power transfer distribution factor; reduced power grid; DC power flow; Ward; power flow forecast

0 引言

随着气候变化、环境污染等问题的日益严重, 国家制定了绿色能源、能源可持续发展等一系列政策^[1-3], 从而使风电、光伏、潮汐能等可再生能源不断并入电网, 由此使大电网的规模不断增大, 此外, 特高压技术也得到了长足的发展^[4-5], 使电网规模更加庞大。

为了适应大电网的安全运行, 并对可能出现的安全稳定进行监视、预警, 出现了多种潮流计算算法^[6-9]。然而, 由于大型电力系统的规模非常大, 从而使大电网的潮流计算非常复杂, 需要消耗大量的时间, 有时甚至出现潮流不收敛的情况^[10]。为了避免上述情况, 国内外学者提出了使用成熟的 Ward 等值技术将大电网不感兴趣的部分简化、只保留感兴趣的部分^[11-12], 从而可以极大的简化电网, 对简

化电网进行潮流计算, 可以极大地提高计算效率、节省时间。

然而, 使用 Ward 虽然能够简化电网, 但却经常会导致高密度的阻抗阵和不稀疏的导纳阵, 从而导致简化网络的潮流计算迭代次数较多, 使计算效率降低, 限值了交流潮流的应用。

目前, 由于直流潮流在有功潮流方面能够获得与交流潮流相近的结果, 因此得到了大的发展, 已成为目前的研究热点^[13-16]。然而, 现有直流潮流算法用于简化电网计算时, 计算结果与原始电网存在较大的误差, 因此, 迫切需要研究一种能够与原始电网潮流计算结果相同的直流潮流算法。

近期, 基于功率转移分布因子(Power Transfer Distribution Factor, PTDF)的直流潮流计算方法得到广泛的研究。例如文献[17]采用 Ward 技术, 使原始大电网得到简化, 在此基础上使用传统直流潮流进

行计算,但是获得的结果误差较大。对此,文献[18]提出了基于PTDF的直流潮流计算方法,其实质是通过PTDF获得简化电网的网络参数,当获得未来节点注入量时,能够得到未来时刻的潮流。由于采用历史数据计算网络参数具有误差,因此使这种方法在用于未来潮流计算时也存在较大的误差。针对这种情况,文献[19]进一步提出了改进的PTDF方法,然而这种方法与传统方法一样,没有给出简化电网结构与原始电网结构之间的关系,这种关系是从原始电网PTDF潮流推导至简化电网PTDF潮流的关键。针对这个问题,本文在文献[19]的基础上,进一步给出了由原始电网至简化电网的关联,从而由原始电网PTDF直流潮流算法过渡到简化电网的PTDF潮流算法更具科学性,且结果更高。

1 文献[19]基于PTDF的直流潮流算法

在直流潮流模式下,有功注入和有功潮流与电压相角的线性关系为

$$\begin{cases} P_{inj} = B_{bus} \theta \\ P_{flow} = B_{branch} C \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_{bus} 表示非满秩节点电纳矩阵; θ 表示电压相角阵; P_{inj} 表示节点注入有功列向量; P_{flow} 表示支路有功潮流列向量; C 表示支路-节点关联矩阵; B_{branch} 表示非满秩支路电纳矩阵。

根据文献[19],当选择参考母线后,就可以构造置换矩阵 P_{ref} ,可将式(1)进一步表示为

$$P_{ref} P_{inj} = \begin{bmatrix} P_{inj}^{ref} \\ P_{inj}^{non-ref} \end{bmatrix} = P_{ref} B_{bus} P_{ref}^T P_{ref} \theta = P_{ref} B_{bus} P_{ref}^T \begin{bmatrix} \theta_{inj}^{ref} \\ \theta_{inj}^{non-ref} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P_{inj}^{ref} 表示参考母线有功注入; $P_{inj}^{non-ref}$ 表示非参考母线有功注入列向量; θ_{inj}^{ref} 表示参考母线电压相角; $\theta_{inj}^{non-ref}$ 表示非参考母线电压相角。

式(2)中的 $P_{inj}^{non-ref}$ 表达式为

$$P_{inj}^{non-ref} = (0 \quad I_{N-1}) P_{ref} P_{inj} = (0 \quad I_{N-1}) \begin{bmatrix} PBP_{11}^{1 \times 1} & PBP_{12}^{1 \times (N-1)} \\ PBP_{21}^{(N-1) \times 1} & PBP_{22}^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{inj}^{ref} \\ \theta_{inj}^{non-ref} \end{bmatrix} = PBP_{21} \theta_{inj}^{ref} + PBP_{22} \theta_{inj}^{non-ref} \quad (3)$$

其中: $P = P_{ref}$; $B = B_{bus}$; N 表示节点总数。

对式(3)移项得

$$\theta_{inj}^{non-ref} = [PBP_{22}]^{-1} (P_{inj}^{non-ref} - PBP_{21} \theta_{inj}^{ref}) \quad (4)$$

对式(1)第二个方程进行推导得

$$P_{flow} = B_{branch} \theta = B_{branch} P_{ref}^T P_{ref} \theta = B_{branch} P_{ref}^T \begin{bmatrix} \theta_{inj}^{ref} \\ \theta_{inj}^{non-ref} \end{bmatrix} = (M^{ref} \quad M^{non-ref}) \begin{bmatrix} \theta_{inj}^{ref} \\ \theta_{inj}^{non-ref} \end{bmatrix} = M^{ref} \theta_{inj}^{ref} + M^{non-ref} \theta_{inj}^{non-ref} \quad (5)$$

式中, M^{ref} 和 $M^{non-ref}$ 分别表示 $B_{branch} P_{ref}^T$ 的参考母线项和非参考母线项。

将式(4)代入式(5)中得

$$P_{flow} = M^{ref} \theta_{inj}^{ref} + M^{non-ref} [PBP_{22}]^{-1} (P_{inj}^{non-ref} - PBP_{21} \theta_{inj}^{ref}) = M^{non-ref} [PBP_{22}]^{-1} P_{inj}^{non-ref} + BP \theta_{inj}^{ref} \quad (6)$$

设参考母线的相角为0,那么由式(6)可得有功潮流与注入之间的线性关系

$$P_{flow} = M^{non-ref} [PBP_{22}]^{-1} P_{inj}^{non-ref} = H' P_{inj}^{non-ref} = \begin{pmatrix} 0 & H' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{inj}^{ref} \\ P_{inj}^{non-ref} \end{pmatrix} = H P_{inj} \quad (7)$$

式中: H' 表示不计参考母线的PTDF矩阵; H 表示考虑参考母线的PTDF矩阵;若系统有 L 条支路, N 个母线,那么 H 就是 $L \times N$ 维的。

式(7)中的 $M^{non-ref}$ 和 PBP_{22} 计算方法为

$$\begin{cases} M^{non-ref} = \text{diag}(1/X) C' \\ PBP_{22} = C'^T \text{diag}(1/X) C' \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{diag}(1/X) = \begin{bmatrix} 1/x_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/x_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & 1/x_L \end{bmatrix}, \quad x_i \text{ 表示}$$

支路 i 的电抗; C' 为 C 消去参考母线所在列后的矩阵。

结合式(7)和式(8),可得 H' 由 C' 和 X 表示为

$$H' = [\text{diag}(1/X) C'] \{C'^T \text{diag}(1/X) C'\}^{-1} \quad (9)$$

进而,依据式(7)可得不依赖参考母线选择的PTDF矩阵 H 。

2 改进的简化电网的直流潮流算法

针对文献[19]没有给出简化电网与原始电网之间的关系,从而导致简化电网产生与原始电网不同的潮流结果等不足,给出改进的简化电网的直流潮流算法。

首先给出简化电网的具体思路和方法。传统Ward等值是在交流潮流的基本思想下,计算简化电

第一步, 使用(9)计算图1(a)原始电网的PTDF矩阵, 详细计算步骤如下:

1) 首先需要根据图1网络结构, 计算出系统的支路-节点关联矩阵 C , 由图1可以容易得到

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2) 由于图2中节点1为平衡节点, 那么根据式(15)可以写出消去平衡节点的节点-支路关联矩阵

$$C' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3) 根据图2中每条支路上的电抗都为 $0.1j$, 那么可以得到式(9)中的 $\text{diag}(1/x)$

$$\text{diag}(1/x) = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (17)$$

4) 从而按式(9)可以计算得到原始电网的PTDF矩阵

$$H' = \begin{bmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 \rightarrow 2 & 0 & -0.786 & -0.571 & -0.500 & -0.214 & -0.429 \\ 1 \rightarrow 5 & 0 & -0.214 & -0.429 & -0.500 & -0.786 & -0.571 \\ 2 \rightarrow 3 & 0 & 0.214 & -0.571 & -0.500 & -0.214 & -0.429 \\ 3 \rightarrow 4 & 0 & 0.071 & 0.143 & -0.500 & -0.071 & -0.143 \\ 3 \rightarrow 6 & 0 & 0.143 & 0.286 & 0 & -0.143 & -0.286 \\ 4 \rightarrow 6 & 0 & 0.071 & 0.143 & 0.500 & -0.071 & -0.143 \\ 5 \rightarrow 6 & 0 & -0.214 & -0.429 & -0.500 & 0.214 & -0.571 \end{bmatrix} \quad (18)$$

第二步, 下面进一步计算图1(b)中简化后系统的PTDF矩阵 H'_r 。

1) 参量 $\Theta_{\text{flow}}^{l \times Le}$, 是一个 $l \times Le$ 维潮流求和矩阵,

表示为

$$\Theta_{\text{flow}}^{l \times Le} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

2) 参量 $H_R^{Le \times N}$ 的计算方式为

$$H_R = [0_{Le \times Li} \quad I_{Le \times Le}] P_{\text{sign}}^{L \times L} P_f^{L \times L} H^{L \times N} (P_g^{N \times N})^T = \begin{bmatrix} 0 & -0.7857 & -0.5714 & -0.5000 & -0.2143 & -0.4286 \\ 0 & -0.2143 & -0.4286 & -0.5000 & -0.7857 & -0.5714 \\ 0 & 0.0714 & 0.1429 & -0.5000 & -0.0714 & -0.1429 \\ 0 & 0.1429 & 0.2857 & 0.0000 & -0.1429 & -0.2857 \\ 0 & 0.0714 & 0.1429 & 0.5000 & -0.0714 & -0.1429 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3) 参量 $\Theta_{\text{injection}}^T$, 表示 $n \times N$ 维母线有功注入求和矩阵

$$\Theta_{\text{injection}}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

4) 根据公式(14)参量 $W_{\text{injection}}^{n \times n}$ 的计算结果为

$$W_{\text{injection}} = (\Theta_{\text{injection}}^{n \times N} \Theta_{\text{injection}}^T)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{G1}} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \frac{1}{m_{Gn}} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} = \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

5) 结合上述参量, 代入式(14)可以计算得到图3简化系统的PTDF

$$H'_r = \Theta_{\text{flow}}^{l \times Le} H_R^{Le \times N} \Theta_{\text{injection}}^T W_{\text{injection}}^{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & -0.6786 & -0.5000 & -0.3214 \\ 0 & -0.3214 & -0.5000 & -0.6786 \\ 0 & 0.1071 & -0.5000 & -0.1071 \\ 0 & 0.2143 & 0.0000 & -0.2143 \\ 0 & 0.1071 & 0.5000 & -0.1071 \end{bmatrix} \quad (23)$$

正如本文引言所提到的, 文献[14]和文献[15]

中的简化网络是基于系统的运行点获得的, 因此简化网络的PTDF矩阵依赖于调度结果。例如当系统的运行点不同时, 简化网络的PTDF阵也极其不同。根据电抗值及式(9)可以计算出 H 。

$$H'_{14} = \begin{bmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ \text{I} \rightarrow \text{II} & 0 & 0.952 & -0.333 & -0.191 \\ \text{I} \rightarrow \text{IV} & 0 & 0.119 & -0.167 & -0.238 \\ \text{II} \rightarrow \text{III} & 0 & 0.786 & 0.500 & 0.429 \\ \text{II} \rightarrow \text{IV} & 0 & 0.095 & 0.667 & -0.191 \\ \text{III} \rightarrow \text{IV} & 0 & 0.214 & 0.500 & 0.571 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$H'_{15} = \begin{bmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ \text{I} \rightarrow \text{II} & 0 & 0.0506 & -0.527 & -0.156 \\ \text{I} \rightarrow \text{IV} & 0 & 0.111 & -0.130 & -0.342 \\ \text{II} \rightarrow \text{III} & 0 & 0.839 & 0.657 & 0.498 \\ \text{II} \rightarrow \text{IV} & 0 & 0.051 & 0.473 & -0.156 \\ \text{III} \rightarrow \text{IV} & 0 & 0.161 & 0.343 & 0.502 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式(24)和式(25)清楚地表明, 尽管 H'_{14} 与 H'_{15} 的元素值不同, 但具有相同的符号, 然而(23)中简化的PTDF矩阵却显示出其不同的元素值和符号特性。由于文献[15]中用于系统简化的运行点没有给出, 所以无法在同一运行点下进行结果的比较。为了比较潮流结果, 给定原始网络的有功注入为 $[-5, 1, 1, 1, 1, 1]$, 则潮流结果如下

$$flow = \begin{bmatrix} flow_{1 \rightarrow 2} \\ flow_{1 \rightarrow 5} \\ flow_{2 \rightarrow 3} \\ flow_{3 \rightarrow 4} \\ flow_{3 \rightarrow 6} \\ flow_{4 \rightarrow 6} \\ flow_{5 \rightarrow 6} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} -5 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.5 \\ -2.5 \\ -1.5 \\ -0.5 \\ 0 \\ 0.5 \\ -1.5 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式(26)表明有功潮流在类 I-IV 之间为 $[-2.5, -2.5, -0.5, 0, 0.5]$, 且有功在每一类中的注入为 $[-5; 2; 1; 2]$ 。使用式(23)、式(24)、式(25)的PTDF矩阵进行潮流计算, 潮流结果如表1所示。为了量化精度, 引进如下的性能指标, 并将其计算结果一并示于表1中。

$$error = \frac{|flow_{original} - flow_{reduced}|_2}{|flow_{original}|_2} \quad (27)$$

其中, 下标为 original 和 reduced 分别表示原始电网和简化电网。

表 1 潮流计算结果

Table 1 Result of power flow

潮流	实际潮流	文献[18]	文献[19]	本文
I->II	-2.5	-0.524	-0.738	-2.5
I->IV	-2.5	-0.405	-0.593	-2.5
II->III	-0.5	2.929	3.331	-0.5
II->IV	0	0.476	0.262	0
III->IV	0.5	2.071	1.669	0.5
误差	-	132%	133%	0%

很明显, 使用文献[18]和文献[19]方法所得到的某些支路上的潮流结果在方向和数值上误差较大。注意到, 文献[19]和本文的算例均为非阻塞算例(即相同的阻塞模式)。由上述结果清楚地表明本文的方法对于潮流研究具有更好的适用性。

4 结论

一般来说, 电力系统的规模非常庞大, 因此, 精确的电力系统优化实际上是不可行的。多种简化方法表明, 由于受精度低、依赖于系统运行点的限制, 其简化方法受到了很大的使用限制。本文中, 提出了一种利用 PTDF 阵来简化网络的算法。简化的 PTDF 矩阵与原系统具有相同的结构属性。在一简单系统中对本文方法进行了测试, 结果显示, 与参考文献中的方法相比, 使用本文方法计算的简化电网潮流精度更高。并且, 其另一个优点是所得到的简化网络不依赖于系统的运行点, 因此, 对于有功潮流研究来说, 本文所提方法能够简洁精确的表示输电网络的有功潮流。因此, 该方法对于大型电力系统最优潮流的计算、国家输电走廊的建设及可再生资源侧的研究等都具有巨大的作用。

参考文献

- [1] 汪锋, 豆南南, 喻冬梅. 基于电力系统碳排放的分省化石能源消费 CO₂ 排放量测算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 105-112.
WANG Feng, DOU Nannan, YU Dongmei. Measurement of provincial CO₂ emission from fossil energy consumption based on carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 105-112.
- [2] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [3] 郑凌蔚, 刘士荣, 周文君, 等. 并网型可再生能源发电系统容量配置与优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 31-37.

- ZHENG Lingwei, LIU Shirong, ZHOU Wenjun, et al. Capacity configuration and optimization of grid-connected renewable energy power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 31-37.
- [4] 郑涛, 赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 127-135.
- ZHENG Tao, ZHAO Yanjie. Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 127-135.
- [5] 程春田, 励刚, 程雄, 等. 大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 549-560.
- CHENG Chuntian, LI Gang, CHENG Xiong, et al. Large-scale ultra high voltage direct current hydropower absorption and its experiences[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 549-560.
- [6] VOROPAIAND N I, IVANOVA E Y. Shapley game for expansion planning of generating companies at many non-coincident criteria[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1630-1637.
- [7] TORRE S, CONEJO A, CONTRERAS J. Transmission expansion planning in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 238-248.
- [8] 高元海, 王淳. 基于全概率公式的含风电配电系统概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 327-334.
- GAO Yuanhai, WANG Chun. Probabilistic load flow calculation of distribution system including wind farms based on total probability formula[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 327-334.
- [9] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.
- MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.
- [10] 郑书生, 李成榕, 何梦. 变压器局部放电复数域牛顿迭代-网络搜索定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 155-161.
- ZHENG Shusheng, LI Chengrong, HE Meng. A novel method of newton iteration in complex field and lattice search for locating partial discharges in transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 155-161.
- [11] 余娟, 张勉, 朱柳, 等. 考虑灵敏度一致性的外网静态等值新理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 64-70.
- YU Juan, ZHANG Mian, ZHU Liu, et al. New theory on external network static equivalent based on sensitivity consistency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 64-70.
- [12] 杨文辉, 毕天姝, 马强, 等. 基于广域网相角信息的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 58-63.
- YANG Wenhui, BI Tianshu, MA Qiang, et al. A method for searching transmission section based on wide-area voltage phasors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 58-63.
- [13] 刘恺, 陈亦平, 张昆, 等. 大型交直流并联输电电网网损优化理论及其在南方电网中的实现[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 130-137.
- LIU Kai, CHEN Yiping, ZHANG Kun, et al. Theoretical study of loss minimization for a large AC/DC power system and its implementation in CSG systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 130-137.
- [14] 刘献超, 任建文, 渠卫东. 基于广度优先法的多支路连锁切除潮流转移快速搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 69-74.
- LIU Xianchao, REN Jianwen, QU Weidong. A fast search algorithm of power flow transfer for multi-branches removal event based on breadth first search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 69-74.
- [15] 陆文甜, 林瞬江, 刘明波, 等. 含风电场的交直流互联电力系统网省协调有功调度优化方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 89-96.
- LU Wentian, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. A regional and provincial grid coordination optimization method for active power dispatch in AC/DC interconnected power system with wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 89-96.
- [16] 黄俊辉, 谈健, 杨俊义, 等. 基于电力系统运行模拟的江苏输电网规划方案网损实证分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 39-42.
- HUANG Junhui, TAN Jian, YANG Junyi, et al. Empirical analysis on transmission loss of Jiangsu power grid planning based on power system operation simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 39-42.
- [17] WARD J B. Equivalent circuits for power flow studies[J]. IEEE Transactions on Power Application Systems, 1949, 68: 373-382.
- [18] CHENG X, OVERBYE T J. PTDF-based power system equivalents[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2005, 20(4): 1868-1876.
- [19] HYUNGSEON O H. A new network reduction methodology for power system planning studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 677-684.

收稿日期: 2015-09-14; 修回日期: 2015-11-03

作者简介:

殷自力(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: yinzl1982@sina.com

陈宇星(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统。

(编辑 张爱琴)