

含电力电子变压器的配电网潮流交替迭代算法

曹 昉, 刘 畅, 李欣宁

(华北电力大学电气与工程学院, 北京 102206)

摘要: 由于能源互联网中能量流执行体——电力电子变压器(PET)的电力电子特性与含 PET 的配电网结构特点,使得传统的潮流计算方法不再适用于含 PET 的配电网。本文提出一种含 PET 的配电网潮流交替迭代算法。首先详细分析了 PET 的潮流调控原理与控制方式,进一步分析了含 PET 的配电网潮流计算特点,依据各部分网络的辐射式结构、有/无源特性及 PET 的变量计算方法等特点,针对不同控制方式下的 PET,分别建立了其潮流计算模型,并采用前推回代交流潮流计算中嵌套 PET 部分潮流计算的方式,计算配电网潮流的整体分布。算例结果验证了所提算法的正确性与有效性,所提算法更深入地分析了含 PET 的配电网潮流计算特点,提出了 PET 在不同控制方式下的潮流计算模型,克服了当前算法无法计算 PET 内部潮流的缺点,更详细直观地阐述了 PET 的控制方式与潮流调控能力,具有较好的应用前景。

关键词: 能源互联网; 电力电子变压器(PET); 潮流计算; 交替迭代法

DOI: 10.12067/ATEEE1709003

文章编号: 1003-3076(2018)07-0041-10

中图分类号: TM461

1 引言

高渗透率可再生能源与储能设备的接入,可控负荷的不断增长,将促使未来配电网发展成为支持可再生能源灵活接入与退出、兼容多种新技术、功率双向流动、智能化的新型配电系统^[1],传统配电网已不能满足建设需求。电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)是一种利用全控型电力电子器件实现高频的能量与功率控制的变换器^[2],相较于传统变压器, PET 不仅具有基本的变压、电气隔离功能,还可使用固态半导体器件与电路对电网内电压与电流进行实时的灵活控制,实现功率双向流动、无功功率补偿、电压暂降补偿等。不需辅助附加其他电能质量调节装置,通过增加操作频率可显著减小重量与体积,使系统更加集成与紧凑^[2,4],满足新型配电系统的建设需求。同时,潮流计算是电力系统分析中最基本、最重要的基础计算,研究适用于含 PET 的配电网潮流计算方法对未来配电网的发展是非常有必要的。

近年来,国内外已有不少学者对 PET 进行研

究,主要集中在以下几方面:①基于 SiC 的新型宽禁带材料的研制、基于 SiC 的固态功率器件及其在 PET 中的应用^[5,6];②中高频变压器设计^[7,8];③拓扑结构^[9,10];④控制策略^[11,12]。而对含 PET 的潮流计算方法研究尚少, PET 作为一种新型电力电子设备,具有电力电子特性,含 PET 的配电网潮流计算已不能再使用传统潮流算法,目前并未有一种明确、具体的含 PET 的配电网潮流算法。文献[13,14]将 PET 原方节点视为系统末梢节点,用前推回代法计算含有 PET 的辐射型配电网潮流。文献[15]在文献[13]研究基础上,针对环形配电网,将 PET 原副方的 VSC 等效为两个断开节点,用 PQ 分解法将交流系统分为两部分先后进行潮流计算。文献[16]针对辐射型配电网也使用了文献[15]的方法。但文献[13,15]的潮流计算过程仅针对 PET 外部网络,忽略了 PET 内部潮流分布情况,没有完整阐述 PET 对配电网潮流的影响机理与方式。文献[17]提出牛顿交替潮流算法,实现了输电网中对 PET 控制变量与状态变量的计算,但文中并未用到 PET 的变压功能,该方法是否适用于配电网潮流计算分析

收稿日期: 2017-09-01

作者简介: 曹 昉(1971-),女,北京籍,副教授,博士,研究方向为电力经济、电力需求侧响应和配电网规划;
刘 畅(1993-),女,河北籍,硕士研究生,研究方向为固态变压器与配电网规划等。

以及含多个 PET 的电网潮流计算还有待进一步深入研究。

本文提出一种含 PET 的配电网潮流交替迭代算法。首先详细分析了 PET 的潮流调控原理与控制方式,进一步根据含 PET 的配电网内各部分网络结构特点确定了 PET 的控制方式,建立了不同控制方式下 PET 的潮流计算模型,并分别采用不同的算法计算系统潮流与 PET 的控制变量。算法通过进一步深入分析含 PET 的配电网特点,确定了 PET 的潮流计算模型,克服了当前算法无法计算 PET 内部潮流分布与控制变量的缺点;通过前推回代交流潮流计算中嵌套 PET 部分内部潮流计算的方法,可计算含 PET 的配电网潮流整体分布,进而可通过确定 PET 控制变量状态来实现对 PET 外特性的控制,调控系统潮流分布。

2 PET 的稳态模型与控制方式

2.1 PET 稳态物理模型

在潮流分析与控制中,为了简化分析,常常忽略高频变压器的暂态过程,故可对 PET 模型^[17-19]进行相应简化,如图 1 所示。其中, r 为换流器等效电阻, x 为换流器交流环节的基波等效电抗, U_{dc} 为 PET 中直流侧电压, m 、 θ 分别为 VSC 的调制比与调制角(交流侧系统电压 U_s 相位超前 VSC 交流侧基波电压 U_c 相位的角度), P_s 、 Q_s 分别为两侧 VSC 与系统交换的有功与无功功率, P_c 、 Q_c 分别为两侧 VSC 吸收的有功及无功功率^[17-19]。

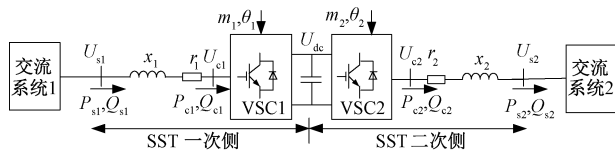


图 1 PET 稳态物理模型

Fig. 1 Steady state physical model of PET

本文所有公式中电压值均为线电压有效值,功率值为三相功率值,功率方向均如图 1 所示。不计 PET 损耗时有:

$$P_{si} = \frac{U_{si} U_{ci} \sin \theta_i}{x_i} (-1)^{i+1} \quad (1)$$

$$Q_{si} = \frac{-U_{si} U_{ci} \cos \theta_i + U_{ci}^2}{x_i} (-1)^{i+1} \quad (2)$$

式中,带有下标 i 的电气参数为第 i 个 VSC 的电气参数, $i = 1, 2$ 。

假设 PET 两侧采用 PWM 调制方式,调制比为

m_i , 直流电压利用率 $\mu = 1$, 则有:

$$U_{ci} = \frac{m_i U_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可见,有功功率的传输主要取决于 θ_i , 无功功率的传输主要取决于 U_{ci} , 而 U_{ci} 取决于 m_i , 故改变 m_i 与 θ_i 即可控制有功功率与无功功率的大小和方向, PET 中两侧 VSC 可在 PQ 平面实现四象限运行^[13]。

本文算法计及 PET 损耗,功率方程为:

$$P_{si} = [U_{si} U_{ci} Y_i \sin(\theta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i] (-1)^{i+1} \quad (4)$$

$$Q_{si} = [-U_{si} U_{ci} Y_i \cos(\theta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i] (-1)^{i+1} \quad (5)$$

$$P_{ci} = [U_{si} U_{ci} Y_i \sin(\theta_i + \alpha_i) - U_{ci}^2 Y_i \sin \alpha_i] (-1)^{i+1} \quad (6)$$

$$Q_{ci} = [U_{si} U_{ci} Y_i \cos(\theta_i + \alpha_i) - U_{ci}^2 Y_i \cos \alpha_i] (-1)^{i+1} \quad (7)$$

式中, $\alpha_i = \arctan(r_i/x_i)$; $Y_i = \sqrt{r_i^2 + x_i^2}$; $x_i = \omega L_i$; $i = 1, 2$ 。

2.2 PET 的控制方式

PET 在正常稳态运行时,其两侧 VSC 可以控制的变量有: PET 与交流系统交换的有功功率 P_s 、无功功率 Q_s , PET 与交流系统相连接节点的母线电压 U_s , 两个 VSC 背靠背连接处的直流侧电压 U_{dc} 。综上所述, PET 的控制方式^[19]有三种: ①定直流电压控制, 控制直流侧电压恒定, 同时控制与系统交换的无功, 为保证有功平衡, 必须至少有一个 VSC 使用这种控制方式; ②定功率控制, 即同时控制与系统交换的有功及无功功率, 适用于连接有源网络的场景; ③定交流电压控制, 控制所连交流母线电压的幅值与相位, 适用于连接无源网络的场景。

由此可见, 控制方式决定了 PET 的外特性, 外特性直接影响了 PET 与系统所连节点的节点类型、节点电压与功率, 进而影响了系统潮流, 故外特性是潮流计算的主要影响因素, 与 PET 内部具体拓扑无关, 且 PET 的潮流计算模型还需根据 PET 的具体控制方式及其在交流系统中所起的具体作用而定。

2.3 PET 的无功补偿

图 2 为具有代表性的典型 AC/DC/AC 型电力电子变压器, 也是本文的研究对象。其工作过程为: 工频交流输入到三相全控整流器中变换为直流, 再采用单相全桥逆变电路将直流调制为高频方波后加载至高频变压器的一次侧, 耦合到高频变压器二次

侧后,高频方波再通过单相全桥逆变电路被整流为直流电压,经过逆变器后被逆变为所需的交流输出电压。

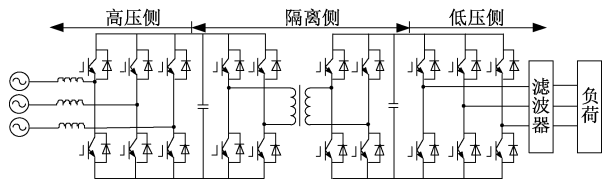


图2 PET的拓扑结构

Fig. 2 PET's topology

由图2可知,三相全控整流器与逆变器均采用全控型器件时具有高度可控性,结合电力系统中功率流动规律,即有功功率由相位超前的地方流向相位滞后的地方,无功功率由电压幅值高的地方流向幅值低的地方,可知PET可通过对电力电子器件的控制来灵活调节换流器交流侧基波电压的幅值与相位,从而实现对PET与系统交换功率的灵活调控,进一步实现对系统潮流的调控。故PET既可吸收无功也可发出无功,可充当无功源,提供无功补偿,实现无功负荷的就近平衡,从而提升配电网中的电能质量。

同时,由式(1)~式(3)可知,PET与系统交换的功率都是PET的控制变量 m_1 、 θ_1 、 m_2 、 θ_2 的函数,故通过控制 m_1 、 θ_1 、 m_2 、 θ_2 就可灵活控制PET输出的无功功率,使PET为系统提供无功补偿,实现功率的四象限运行。

3 含PET的配电网潮流交替迭代算法

3.1 含PET的配电网潮流计算特点

PET作为一种新型高效的电力电子设备,具有电力电子特性,含PET的配电网潮流计算除需计算电网中的潮流分布,还需求解出PET的控制变量与状态变量等稳态变量值,传统的潮流算法已然无法适用。需结合PET的外特性并借鉴当前含有电力电子设备的电力系统潮流算法,来得到适合于含PET的配电网潮流算法。

假设配电网三相对称,含有PET的配电网具有以下四个特点:①配电网精确潮流求解一般采用前推回代法;②配电网中含有电力电子设备,其潮流计算不同于以往;③配电网为闭环设计、开环运行,配电网中加入PET后,网络整体结构仍为辐射状结构,交流系统电气连接会变弱;④整个配电网会被分为多个交流网络,可能会出现无源交流系统(配

网中可能含有分布式电源),有源交流系统与无源交流系统无法采用一种算法同时进行求解。

综上所述,含有PET的配电网更适合应用交、直流系统的潮流方程可分开求解的交替迭代法进行潮流计算,但传统的交替迭代法不适用于含PET的配电系统,还需对其中各部分网络特点与PET的具体控制方式进行分析来对算法加以改进。

根据以上分析,辐射型配电网中加入PET后,可以简化为如图3所示的结构。

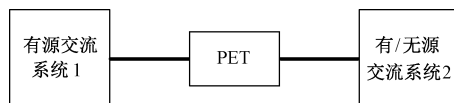


图3 含PET的配电网结构图

Fig. 3 Distribution network structure diagram

依据是否含有分布式电源将含PET的配电网潮流分为以下两种情况讨论,本文从辐射状结构末端进行前推式分析,系统特点分析如下:

(1) 配电网中不含分布式电源

无源交流系统2具有以下两个特点:①无平衡节点;②系统负荷恒定。系统内有功与无功功率恒定,故与无源交流系统2相连接的PET二次侧VSC需采用定交流电压控制方式。此部分系统视与PET二次侧相连交流母线为平衡节点,采用前推回代法求解潮流,不需要参与迭代计算。

PET具有以下3个特点:①由于此时无源交流系统2内负荷固定,即PET二次侧与无源交流系统2的交换功率(P_{s2} 、 Q_{s2})恒定,故可联立功率方程组求解PET二次侧控制变量,其二次侧不必参与迭代计算;②PET正常稳态运行时,直流侧电压 U_{dc} 必须保持恒定,即意味着PET中的直流环节必须保持有功功率的平衡,故PET一次侧VSC必须定直流电压控制;③PET一次侧可视为与之连接的交流系统的等效负荷,其一次侧控制变量可根据具体情况用相应数学算法求解。经以上分析可知PET两侧变量求解方式因网络结构与控制方式限制而有差异。

有源交流系统1与PET一次侧的连接即类似于VSC-HVDC中交流系统与换流器相连,求解交流系统1的潮流时,采用前推回代法计算,可将PET一次侧视为连接在相应节点上的已知有功与无功功率的负荷来等值;求解PET一次侧的潮流分布与控制变量时,将交流系统模拟成加在VSC交流母线上的一个恒定电压,从而进行迭代计算。

(2) 配电网中含有分布式电源

系统中含有分布式电源时, PET 两端连接系统均为有源交流系统。针对分布式电源的随机性与波动性, 可将分布式电源根据所连接换流器的控制方式, 视情况等效为 PQ、PV、PI 和 PQ(V) 节点, PET 可以采取适当的控制策略, 如文献[20]中所述, 来保持 PET 一次侧单位功率因数运行, 直流电压与二次侧输出电压稳定, 使得在分布式电源不稳定时, 系统潮流仍然平稳。故此时系统仍可按以上分析, 用本文所提算法进行潮流计算。

3.2 PET 的潮流计算模型

由 3.1 节分析可知, PET 的二次侧 VSC 需采用定交流电压控制方式, 控制二次侧与交流系统相连接节点的电压幅值与相位(设为 U_{s2}^{ref}), 此节点视为交流系统 2 的平衡节点, 使用前推回代法计算交流系统 2 的潮流可得到交流系统 2 与 PET 二次侧的交换功率 P_{s2} 、 Q_{s2} , 故 PET 二次侧的修正方程式为:

$$\begin{cases} \Delta P_{s2} = P_{ac-s2} - P_{s2} = 0 \\ P_{s2} = U_{s2}^{\text{ref}} U_{c2} Y_2 \sin(\alpha_2 - \theta_2) - (U_{s2}^{\text{ref}})^2 Y_2 \sin \alpha_2 \\ \Delta Q_{s2} = Q_{ac-s2} - Q_{s2} = 0 \\ Q_{s2} = U_{s2}^{\text{ref}} U_{c2} Y_2 \cos(\theta_2 - \alpha_2) - (U_{s2}^{\text{ref}})^2 Y_2 \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{ac-s2} 、 Q_{ac-s2} 分别为交流系统 2 计算得到的与 PET 二次侧交换的有功及无功功率。此模型转换为由 PET 的控制变量与状态变量表达的函数形式为:

$$\begin{cases} P_{s2} = f_1(m_2, \theta_2, U_{dc}, U_{s2}^{\text{ref}}) \\ Q_{s2} = f_2(m_2, \theta_2, U_{dc}, U_{s2}^{\text{ref}}) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, U_{s2}^{ref} 为 PET 二次侧的控制值, P_{s2} 、 Q_{s2} 可由交流系统 2 的潮流计算得到, PET 一次侧的定直流电压控制方式使得直流侧电压 U_{dc}^{ref} 已知且恒定, 故未知量只有 PET 二次侧的两个控制变量 m_2 与 θ_2 , 此时可直接联立式(9)中的功率方程组求得 m_2 与 θ_2 , 不需参与迭代过程。

PET 一次侧采用定直流电压控制方式, 控制直流侧电压 U_{dc}^{ref} 恒定, 同时控制与系统交换的无功 Q_{s1}^{ref} , PET 的修正方程式为:

$$\begin{cases} \Delta Q_{s1} = Q_{s1} - Q_{s1}^{\text{ref}} = 0 \\ Q_{s1} = -U_{s1} U_{c1} Y_1 \cos(\theta_1 - \alpha_1) + U_{s1}^2 Y_1 \cos \alpha_1 \end{cases} \quad (10)$$

为使 PET 一次侧的控制变量 m_1 与 θ_1 可解, 还需增加 PET 的有功平衡方程式, 如式(11)所示:

$$\begin{cases} \Delta P = P_{c1} - P_{c2} = 0 \\ \Delta P_{c1} = P_{c1} - U_{s1} U_{c1} Y_1 \sin(\theta_1 + \alpha_1) - U_{c1}^2 Y_1 \sin \alpha_1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)是在 PET 两侧 VSC 有功损耗已用等效电阻 r_i 表示的情况下成立的, 式(10)、式(11)构成 PET 的一次侧潮流计算模型。

3.3 算法求解

由 3.1 与 3.2 节的分析可得如下的算法求解过程:

(1) 首先根据 PET 控制方式与控制值, 给定 U_{s2} 、 U_{dc} 、 Q_{s1} 。

(2) 将与 PET 二次侧所连交流母线视为平衡节点, 用前推回代法计算交流系统 2 的潮流, 得出交换功率 P_{s2} 、 Q_{s2} , 根据式(8)结合给定值可求出 m_2 、 θ_2 :

$$\theta_2 = \alpha_2 - \arctan \frac{P_{s2} + U_{s2}^2 Y_2 \sin \alpha_2}{Q_{s2} + U_{s2}^2 Y_2 \cos \alpha_2} \quad (12)$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{2} P_{s2} + U_{s2}^2 Y_2 \sin \alpha_2}{U_{dc} U_{s2} Y_2 \sin(\alpha_2 - \theta_2)} \quad (13)$$

(3) 求得 m_2 、 θ_2 之后结合给定值, 根据式(6)可计算出 P_{c2} , 根据 PET 的有功平衡有:

$$P_{c1} = P_{c2} \quad (14)$$

PET 一次侧与有源交流系统 1 采用交替迭代法迭代计算, 其中 PET 一次侧控制变量采用牛拉法求解, 首先需确定变量初值 $\theta_{1_initial}$ 、 $m_{1_initial}$, 变量初值由式(2)、式(15)并结合有源交流系统 1 的交流潮流结果确定, 如式(16)和式(17)所示。

$$P_{ci} = \frac{U_{si} U_{ci} \sin \theta_i}{x_i} (-1)^{i+1} \quad (15)$$

$$\theta_{1_initial} = \arctan \frac{P_{c1}}{U_{s1}^2 / x_1 - Q_{s1}} \quad (16)$$

$$m_{1_initial} = \frac{\sqrt{2} P_{c1} x_1}{U_{s1} \sin \theta_{1_initial} \cdot U_{dc}} \quad (17)$$

PET 一次侧功率不平衡量如式(10)、式(11)所示, 用泰勒级数展开并除去高次项后可得牛顿法潮流修正方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{c1} \\ \Delta Q_{s1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{c1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{c1}}{\partial m_1} \\ \frac{\partial Q_{s1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_{s1}}{\partial m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta m_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

(4) 求得 PET 一次侧控制变量 m_1 、 θ_1 后, 可根据式(4)、式(5)求得 P_{s1} 、 Q_{s1} , 作为等效负荷送入有源交流系统 1 中, 采用前推回代法进行潮流计算, 待交流系统计算收敛后得到 U_{s1} , 又可以作为 PET 一

次侧部分与系统相连的交流母线恒定电压,求解 PET 的控制变量与状态变量,进行迭代计算。

3.4 交替迭代收敛判据

在交替求解过程中, P_{s1}, Q_{s1} 由 PET 一次侧的潮流计算结果进行修正。若 PET 一次侧采用控制变量、控制值与结合式(4)、式(5)计算的潮流结果 P_{s1}^k, Q_{s1}^k , 与用本次交流系统潮流结果 P_{ac-s1}^k, Q_{ac-s1}^k 之差小于计算允许误差 ξ , 则 P_{s1}, Q_{s1} 无需再修正; 否则应利用 U_{s1}^k 修改相应节点的 PET 一次侧潮流参数再次计算。故交替迭代法收敛判据为:

$$\begin{cases} |U_i^k - U_i^{k+1}| < \xi & i = 1, 2, \dots, n_c \\ |P_{s1}^k - P_{ac-s1}^k| < \xi \\ |Q_{s1}^k - Q_{ac-s1}^k| < \xi \end{cases} \quad (19)$$

式中, P_{s1}^k, Q_{s1}^k 为第 k 次迭代过程中使用牛拉法所得的 PET 一次侧潮流计算结果; P_{ac-s1}^k, Q_{ac-s1}^k 为第 k 次迭代过程中由交流系统潮流计算所得的潮流结果, 均表示 PET 一次侧与系统交换的有功与无功功率; U_i^k 为第 k 次迭代过程中交流系统 1 的 i 节点电压; n_c 为交流系统 1 的节点总数。

4 算法步骤

含 PET 的配电网潮流交替迭代算法步骤如下:

(1) 输入交流系统与 PET 部分的潮流计算数据, 确定 PET 控制方式与控制值、分布式电源并网参数, 为方便编程, 置交流系统 2 迭代次数 i 为 1, 交替求解迭代次数 k 为 0。

(2) 以交流系统 2 与 PET 二次侧相连接交流母线为平衡节点, 结合 PET 控制值, 初始化系统电压与 PI 节点无功值, 用前推回代法计算交流系统 2 的潮流, 并求得 P_{s2}, Q_{s2} , 由式(12)、式(13)求得 m_2, θ_2 , 进一步由式(6)求得 P_{c2} 。

(3) 根据 PET 的有功平衡, 牛拉法求解 PET 一次侧控制变量。先由式(16)、式(17)确定变量初值 $\theta_{1_initial}^k, m_{1_initial}^k$ (上标 k 表示该变量为第 k 次迭代过程中的计算结果, 下同), 再采用修正方程组式(18)迭代求解变量直至收敛, 求得 m_1^k, θ_1^k , 由式(4)、式(5)可求得 P_{s1}^k, Q_{s1}^k 。

(4) 将 PET 一次侧与有源交流系统 1 的交换功率 P_{s1}^k, Q_{s1}^k 视为两者连接节点处的等效负荷, 采用前推回代法计算交流系统 1 潮流直至收敛, 可计算得到交流母线电压 U_{s1}^k 与注入 PET 一次侧的功率 P_{ac-s1}^k, Q_{ac-s1}^k 。

(5) 比较 PET 一次侧潮流结果 P_{s1}^k, Q_{s1}^k 与有源交流系统 1 计算出的潮流结果 P_{ac-s1}^k, Q_{ac-s1}^k , 若满足收敛条件式(19), 视为整个系统潮流计算的收敛; 否则, 采用 U_{s1}^k 修改 PET 部分潮流计算参数, 置 $k = k + 1$, 返回步骤(3)。

计算流程图如图 4~图 6 所示。图 4 中 Q_{DG}^{i+1} 为第 $i+1$ 次潮流计算时分布式电源注入系统的无功功率。

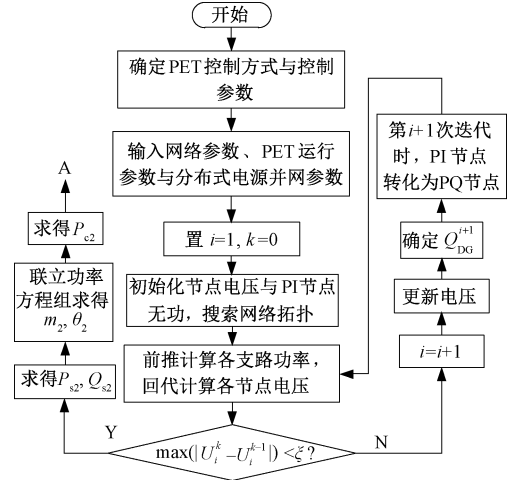


图 4 交流系统 2 与 PET 二次侧计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart of AC system 2 and PET's secondary side

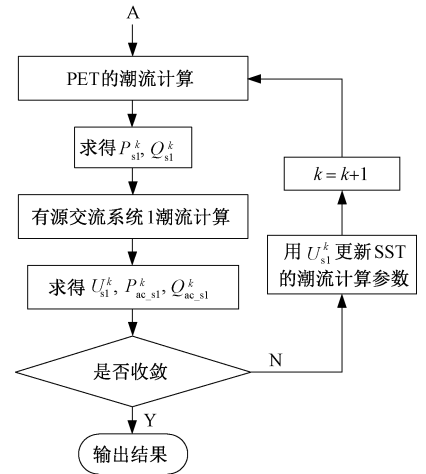


图 5 交替迭代计算流程图

Fig. 5 Calculation flow chart of alternative iterative algorithm

5 算例分析

5.1 WSCC-9 节点算例对比分析

(1) 算例参数设置

因含 PET 的配电网潮流算法研究非常少, 故根

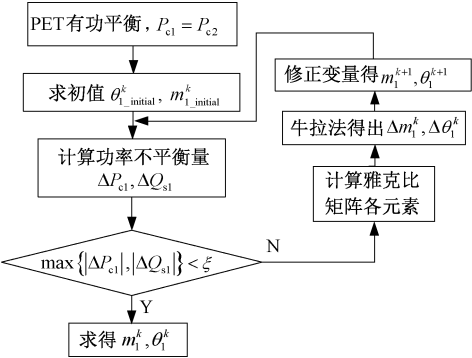


图6 PET的潮流计算流程图

Fig. 6 Calculation flow chart of PET's power flow

据当前已有研究,选定文献[17]中的算例作为对比,来验证本文算法的正确性。算例数据见文献[17],由于算法主要应用于配电网,需采用辐射状运行方式,故考虑到前推回代法计算潮流的通用性,在不改变支路输入输出关系的条件下,对原算例网络修改如下:①将节点7所连的发电机2用相应的负荷代替,节点7改为PQ节点;②断开算例中节点5与节点6间的支路。修改后的网络可视作配电网结构,应用于本文所提场景。修改后的WSCC-9节点系统如图7所示。

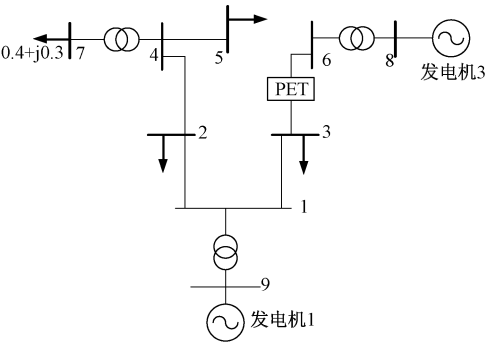


图7 修改后的WSCC-9节点系统

Fig. 7 Modified WSCC-9-bus system

按照文献[17]中四种控制情景,用文献[17]所提方法(方法一)和本文算法(方法二)分别进行计算。先采用方法一计算未经修改的含PET的WSCC-9节点系统潮流,得到支路5-6上的功率与节点6电压,再将此功率等效为此线路两端节点的注入功率,将节点6电压视为方法二中PET二次侧电压控制值,使用本文算法进行计算。

(2) 结果对比分析

为了验证本文算法的正确性,本文将分别对比使用两种算法计算得到的电压与PET控制变量,结

果如表1和表2所示。

表1 电压结果与对比

Tab. 1	Results and comparison of voltage			
	节点3电压(pu)			
	情景①	情景②	情景③	情景④
方法一	0.89862	0.66373	0.87216	0.69522
方法二	0.89771	0.66307	0.8705	0.69351
误差	0.00091	0.00066	0.00166	0.00171
误差百分比(%)	0.10127	0.09944	0.19033	0.24597

表2 PET控制变量对比

Tab. 2	Comparison of PET's control variable			
	PET变量 $\theta_1 / (^\circ)$			
	情景①	情景②	情景③	情景④
方法一	0.24524	0.61829	0.30991	0.58564
方法二	0.24714	0.61991	0.31271	0.58693
误差	-0.0019	-0.00162	-0.0028	-0.00129
误差百分比(%)	0.7688	0.26133	0.8954	0.21979

表1和表2为在每种控制情景下两种算法所得电压及PET两侧控制变量误差最大的情况。由表1、表2可知,在四种控制情境下,两种算法中节点3电压与PET控制变量 θ_1 的误差均为最大。这是由于方法一与方法二对PET内部潮流计算的不同,导致两种算法所计算的 P_{s1} 不同,而 P_{s1} 主要影响 θ_1 ,又是节点3上的等效负荷,故两种算法的不同对节点3的电压与PET控制变量中的 θ_1 影响是最大的,但电压最大误差仅为0.24597%,PET控制变量最大误差也仅为0.8954%。通过计算结果与以上对比分析可知,两种算法具有相同的正确性。

5.2 IEEE118节点算例结果分析

(1) 算例参数设置

本文考虑配电网三相对称情况,使用IEEE118节点^[21]算例,对原算例修改如下:将PET加在支路29-30中,变比取为35kV/11kV,节点52处加入光伏发电类型的分布式电源,处理为PI节点类型。PET一次侧为单位功率因数运行,采取定直流电压控制方式,二次侧采取定交流电压控制方式。网络参数变化情况如表3所示。

(2) 结果对比分析

将含PET含分布式电源的网络(情景①)与不含PET含分布式电源、含普通变压器的网络(情景②)进行对比分析,计算结果如图8、表4和表5所示。该算例中共有118个节点,图8中节点最大编号为123,因为算例中节点编号是不连续的。

表 3 网络参数	
Tab.3 Network parameters	
参数	变化情况
35kV 线路电阻 r	是原来 11kV 线路电阻的 1/3
35kV 线路电抗 x	是原来 11kV 线路电抗的 3 倍
35kV 网络负荷	是原来 11kV 负荷的 3 倍
普通变压器	$R = 1.127\Omega, X = 9.188\Omega$
	$U_{dc} = 1.7U_N$
PET 参数设置	$r_i = 0.1\Omega, i = 1, 2$
	$x_i = 0.314\Omega, L_i = 1\text{mH}, i = 1, 2$
PET 控制参数	$U_{s2} = 1.03\angle 0^\circ\text{pu}, Q_{s1} = 0$
分布式电源	PI 型 DG, $P_s = 1\text{MW}, I_s = 100\text{A}$
电网平衡节点	$U = 1\angle 0^\circ\text{pu}$

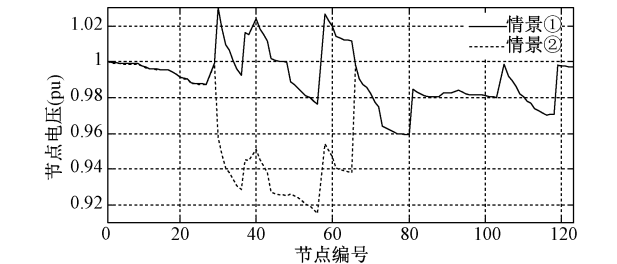


图 8 情景①与情景②的电压比较

Fig.8 Voltage comparison between scenario ① and scenario ②

表 6 典型节点电压对比 (情景①和情景②)										
Tab.6 Comparison of voltage (scenario ① and scenario ②)										
(单位:pu)										
节点	4	6	10	29	30	35	42	52	66	105
情景①	0.99941	0.99922	0.99791	0.999260	1.030000	0.99590	1.01508	0.98312	0.998168	0.998940
情景②	0.99907	0.99888	0.99776	0.998572	0.957913	0.93109	0.94182	0.92281	0.998168	0.998940
电压差值	0.00034	0.00034	0.00015	0.000688	0.072087	0.06481	0.07326	0.06031	3.66E-14	8.88E-16

由表 6 结果分析可知,不同的节点电压变化幅度不同,节点 30、35、42 与 52 电压提升非常明显,节点 4、6 与 10 电压涨幅相对不明显,节点 66 与 105 电压几乎不变。原因如下:①IEEE118 节点网络由与平衡节点相连的分别以节点 2、66 与 105 为首的大型树形支路(树 1、2、3)构成,因平衡节点电压不变,树 2、3 中节点负荷不变,故其中节点电压几乎不变;②PET 处于树 1 中支路 29-30 中,因 PET 二次侧定交流电压控制,直接提升了与之相连的节点 30 的电压幅值,从而使得树 1 中节点 30 之后的一系列节点电压明显升高;③节点 4 与 6 距离 PET 一次侧所连交流母线节点 29 较近,PET 一次侧为单位功率因数运行,无功补偿作用明显,但节点 10 及其所在支路相对较远,故无功补偿作用较弱,电压涨幅相对不明显。

表 4 电压质量的对比				
Tab.4 Comparison of voltage quality				
情景	电压最小值(pu)	所在节点	电压最小值差值(pu)	越限节点数
情景①	0.959283	80	0.043834	0
情景②	0.915449	56		30

表 5 PET 变量计算结果 (情景①)			
Tab.5 Results of PET's variable (scenario ①)			
m_1	$\theta_1 / (^\circ)$	m_2	$\theta_2 / (^\circ)$
0.83043	0.09128	0.86659	-0.1879

由上述结果可知,本文算法能够计算含 PET 含分布式电源的大规模配电网潮流,加入 PET 后,系统电压水平整体提高,无电压越限节点,电能质量较好。以上结果的出现,是由于 PET 一次侧单位功率因数运行,补偿系统无功,PET 二次侧定交流电压控制,直接提升了与系统相连的节点 30 的电压幅值,从而带动该节点后一系列节点电压幅值的升高。

由图 8 可知,仅有一部分节点的电压幅值得到提升,而另一部分节点的电压幅值相较于未加入 PET 时没有发生变化,在此本文挑取一些典型节点对这种情况进行具体的分析,结果如表 6 所示。

假设在情景①的支路 10-11 中放一台 PET2(支路 29-30 中放置的 PET 设为 PET1),此情景设为情景③;若在情景②的支路 10-11 中放一台普通变压器,设为情景④。PET2、普通变压器及网络中线路的参数设置如表 3 所示,情景③与情景④的潮流计算结果对比如图 9、表 7 和表 8 所示。

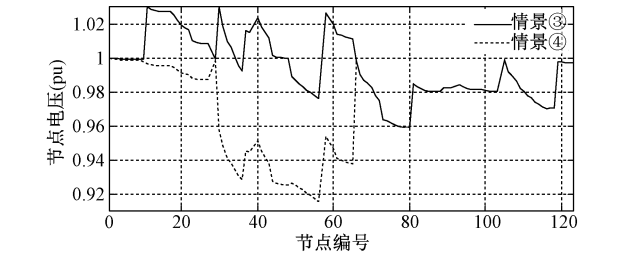


图 9 情景③与情景④的电压比较

Fig.9 Voltage comparison between scenario ③ and scenario ④

表 7 典型节点电压对比(情景③和情景④)

Tab. 7 Comparison of voltage (scenario ③ and scenario ④)
(单位:pu)

节点	2	11	22	66	105
情景③	0.99978	1.03000	1.01701	0.99817	0.99894
情景④	0.99959	0.98695	0.97337	0.99817	0.99894
电压差值	0.00019	0.04305	0.04364	1.47E-15	7.69E-16

表 8 PET 变量计算结果(情景③)

Tab. 8 Results of PET's variable (scenario ③)

变量	m_1	$\theta_1 /(^{\circ})$	m_2	$\theta_2 /(^{\circ})$
PET1	0.83507	0.09125	0.86659	-0.1879
PET2	0.83127	0.02796	0.8595	-0.0729

由图 9、表 7 与表 8 分析可知,本文算法能够计算含多台 PET 含分布式电源的大规模配电网潮流。通过对比分析可知,不同节点的电压幅值变化幅度有差异,原因仍是上文提到的 3 个原因,不再赘述。

综上所述,PET 可提供无功补偿,调控潮流,实

现功率的双向流动,有效地提高配电网中电能质量,但其对节点电压幅值的提升作用与 PET 所处位置,即 PET 距离系统内节点的电气距离,及配电网的结构有关。

6 算法比较

首先,由于高渗透率分布式电源接入到配电网中的需求以及当前电力电子器件技术的限制,能源互联网的建设与研究一定首先始于配电网^[22],故研究适用于含 PET 的配电网潮流计算方法对能源互联网的发展是非常有必要且具有实际意义的。其次,含 PET 的配电网独有的特点使得传统潮流算法无法适用于含 PET 的配电网潮流分析。最后,算法需能计算含多台 PET 的电网潮流,才更加具有普适性。综合以上三点可知,本文算法可以计算含多台 PET 的配电网潮流,而文献[17]算法无法计算含 PET 的配电网潮流,其是否适用于含多台 PET 的输电网潮流计算,还有待进一步研究。两种算法的比较如表 9 所示。

表 9 算法特点对比		
Tab. 9 Features comparison of two algorithms		
特点	本文算法	文献[17]算法
适用网络	配电网	输电网
连接网络有/无源	PET 一次侧接有源网络,二次侧接无源网络或含 DG 的有源网络	PET 一、二次侧均接有源网络
网络划分	3 部分,交流系统 2/PET/交流系统 1	2 部分,交流部分/PET
交流部分潮流算法	前推回代法	牛拉法
PET 控制方式	一次侧 VSC 定直流电压控制 二次侧 VSC 定交流电压控制	一次侧 VSC 定直流电压控制 二次侧 VSC 定功率控制
交替求解所用之处	PET 一次侧	PET 一、二次侧
是否适用于含多个 PET 的网络	是	待研究

7 结论

本文提出一种含 PET 的配电网潮流交替迭代算法,该算法根据含 PET 的配电网结构特点及各部分网络的有/无源特性等,确定了所需 PET 的控制方式,建立了 PET 在不同控制方式下的潮流计算模型,并采用前推回代交流潮流计算过程中嵌套 PET 部分潮流计算的方式,求解网络整体的潮流分布情况。算例结果分析可知,本文算法可用于计算含多台 PET 的大型多节点配电网(包括分布式电源接入下的配电网)潮流,经与 WSCC-9 节点潮流结果对比可知,算法正确性较高。含分布式电源、含 PET 的 IEEE118 节点配电网的潮流结果表明,PET 可通过

确定控制变量的状态来提供无功补偿,提升电压质量,实现对配电网内潮流的灵活控制。算例结果验证了算法的有效性。本文算法突出了 PET 在网络中的电压与潮流调控作用。

参考文献 (References):

[1] 邓建玲 (Deng Jianling). 能源互联网的概念及发展模式 (Concept of energy internet and its development modes) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2016, 36 (3): 1-5.

[2] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等 (Zha Yabing, Zhang Tao, Huang Zhuo, et al.). 能源互联网关键技术分析 (Analysis of energy internet key technologies) [J]. 中国科

- 学: 信息科学 (Science China: Information Science), 2014, 44 (6): 702-713.
- [3] Gao Z, Fan H. A modular bi-directional power electronic transformer [J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16 (2): 399-413.
- [4] Bignucolo F, Bertoluzzo M, Fontana C. Applications of the solid state transformer concept in the electrical power system [A]. AEIT International Annual Conference (AEIT) [C]. 2015. 1-6.
- [5] Madhusoodhanan S, Tripathi A, Patel D, et al. Solid-state transformer and MV grid tie applications enabled by 15 kV SiC IGBTs and 10 kV SiC MOSFETs based multi-level converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51 (4): 3343-3360.
- [6] Mainali K, Tripathi A, Madhusoodhanan S, et al. A transformerless intelligent power substation: A three-phase PET enabled by a 15-kV SiC IGBT [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2015, 2 (3): 31-43.
- [7] Chen H, Divan D. High-frequency transformer design for the soft-switching solid state transformer (S4T) [A]. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. 2017. 2534-2541.
- [8] 薛伟, 郑丽君, 高云广, 等 (Xue Wei, Zheng Lijun, Gao Yunguang, et al.). 电力电子变压器中高频变压器的设计方法 (Design method of high frequency transformer in power electronic transformer) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2015, 52 (23): 117-121.
- [9] Chen H, Prasai A, Divan D. Dyna-C: A minimal topology for bidirectional solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (2): 995-1005.
- [10] 王轩, 付永生, 晋湾湾, 等 (Wang Xuan, Fu Yongsheng, Jin Wanwan, et al.). 一种新型结构的电力电子变压器 (Novel topology of power electronic transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 67-74.
- [11] 王丹, 田杰, 毛承雄, 等 (Wang Dan, Tian Jie, Mao Chengxiong, et al.). 智能电网中的电子电力变压器: 改善电力系统可控性 (Electronic power transformer for smart grids: Improving the controllability of electric power systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 21-33.
- [12] 高范强, 李子欣, 徐飞, 等 (Gao Fanqiang, Li Zixin, Xu Fei, et al.). 一种高频链模块化电力电子变压器 (Power electronic transformer based on modular converter with high-frequency link) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 51-58.
- [13] 崔艳艳, 毛承雄, 陆继明, 等 (Cui Yanyan, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al.). 基于电子电力变压器的配电网电压无功综合优化控制 (Voltage and reactive power synthetic optimization in the distribution system based on electronic power transformer) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2006, 34 (6): 24-28.
- [14] 张祥龙, 周晖, 肖智宏, 等 (Zhang Xianglong, Zhou Hui, Xiao Zhihong, et al.). 电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用 (Power electronic transformer applied to optimization of reactive power in active distribution system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (4): 80-85.
- [15] 陈芬, 王丹, 沈黎明, 等 (Chen Fen, Wang Dan, Shen Liming, et al.). 基于电子电力变压器的潮流优化 (Optimal power flow control based on electronic power transformer) [A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会暨中国电机工程学会电力系统专业委员会 2010 年年会 (China Electric Power System and its Automation Professional Academic Conference and the China Electrical Engineering Society of Power System Professional Committee 2010 Annual Meeting) [C]. 2010.
- [16] 张伟 (Zhang Wei). 主动配电网中含有电力电子变压器的无功优化控制研究 (Reactive power optimization with electronic power transformer in active distribution network) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2014.
- [17] 张俊峰, 刘云, 陈迅, 等 (Zhang Junfeng, Liu Yun, Chen Xun, et al.). 基于 PSASP 的电子电力变压器建模与仿真 (Modeling and simulation of electronic power transformer based on power system analysis software package) [J]. 水电能源科学 (Water Resources and Power), 2014, 32 (1): 184-188.
- [18] 毛承雄 (Mao Chengxiong). 电子电力变压器 (Electronic power transformer) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2010.
- [19] 刘云 (Liu Yun). 基于电子电力变压器的电力系统稳定性研究 (Stability study on power system based on electronic power transformer) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2013.
- [20] 张明锐, 刘金辉, 金鑫 (Zhang Mingrui, Liu Jinhui, Jin Xin). 应用于智能微网的 SVPWM 固态变压器研究 (Research on the SVPWM solid state transformer applied in smart micro-grid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (1): 90-

97.

[21] Zhang D, Fu Z, Zhang L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77 (5): 685-694.

[22] 盛万兴, 段青, 梁英, 等 (Sheng Wanxing, Duan Qing, Liang Ying, et al.). 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究 (Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (15): 3760-3769.

Alternative iteration algorithm for power flow of distribution network
with power electronic transformer

CAO Fang, LIU Chang, LI Xin-ning
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: Due to the power electronic characteristics of power electronic transformer (PET) which is an energy flow operation device of Energy Internet and the structural features of the distribution network with PET, traditional power flow algorithm is no longer suitable for the distribution network with PET. Therefore, an alternative and iterative power flow algorithm of the distribution network with PET is proposed in this paper. Firstly, the control modes and the power flow control principles of PET are analyzed in detail. Further, the power flow calculation characteristics of the distribution network with PET are analyzed. According to the radiation structure of each part of the network, the feature whether a power is in the part of the network, the variable calculation method of PET, and so on, different power flow calculation models are established for power electronic transformers under different control modes, and the overall distribution of power flow is calculated by the algorithm in which the power flow calculation of PET section is nested in the AC power flow calculation based on forward-backward sweep method. The results of examples verify the correctness and efficiency of the proposed algorithm which analyzes the power flow calculation characteristics of the distribution network with PET further and proposes different power flow calculation models for power electronic transformers under different control modes. The proposed algorithm overcomes the shortcoming of current algorithms which are not able to calculate the internal power flow of PET and elaborates the control methods and ability of power flow regulation of PET. Therefore, the proposed algorithm can be applied more efficiently.

Key words: Energy Internet; power electronic transformer (PET); power flow calculation; alternative iteration algorithm