

基于多变量解耦控制的配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法

郭谋发, 郭彩虹, 郑泽胤

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要:随着静止无功补偿装置、柔性消弧装置、大功率逆变器等电力电子装备应用逐渐增多,配电网柔性化加快发展,但已有电力电子装备存在功能单一、成本高等问题。基于直流侧并接储能元件的直挂式级联H桥变流器,将多变量解耦控制方法与电流消弧方法相结合,实现柔性电力电子装备输出电流在 $dq0$ 坐标系下的独立调节,使单套柔性电力电子装备同时集成配电网有功功率、无功功率双向流动控制,以及单相接地故障柔性消弧功能,有效提高电力电子装备的利用效率。理论分析以及功率控制和单相接地故障消弧建模仿真结果验证了所提方法的可行性。

关键词:配电网;单相接地故障;集成化柔性消弧方法;多变量解耦控制;电流消弧法;有功功率;无功功率

中图分类号:TM 713

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202106021

0 引言

我国配电网在快速发展的同时,依旧存在着许多问题,如配电网单相弧光接地故障产生的过电压易引发相间短路故障,进而导致故障扩大,危及人员和设备安全^[1];大量感性负载接入配电网后产生的无功功率使得配电网功率因数降低^[2]、电能质量下降^[3];配电网分布式电源的高渗透率引发的配电网有功损耗加重^[4]、电压越限等问题^[5]。一般通过安装各类相应的电力电子补偿装置来解决上述问题,如安装柔性消弧装置用于单相接地故障消弧;安装静止同步补偿器STATCOM(Static synchronous COMPensator)、静止无功发生器SVG(Static Var Generator)等装置用于无功补偿;安装含蓄电池储能系统的STATCOM用于有功补偿,减小配电网有功损耗,为其提供有功瞬态支撑^[6]。然而,投运大量功能单一的电力电子补偿装置,存在装置成本高、利用效率低,以及各装置软硬件不同造成的生产及维护不便等问题。

为解决上述问题,集成多功能的柔性电力电子装备FPEE(Flexible Power Electronics Equipment)及技术的研究逐渐成为热点。国内已有学者利用电力电子装备集成单相接地故障柔性消弧及故障选线2种功能^[7-9],但未涉及有功、无功功率控制,无法补偿配电网的有功及无功功率。文献[10]提出将储能装置并接于STATCOM的直流侧,可实现有功和无功功率的解耦控制以满足配电网的有功及无功功率需求。文献[11]研究了链式STATCOM的有功及无

功功率的控制方法,利用解耦脉冲宽度调制(PWM)控制实现对有功和无功功率的独立调节功能。但文献[10-11]未对配电网单相接地故障柔性消弧进行研究,无法实现单相接地故障柔性消弧。文献[12]提出在配电网STATCOM的星形连接点与大地间串入消弧线圈,在配电网正常运行时实现无功功率补偿,在配电网发生单相接地故障时实现柔性消弧,但该装置仍需要传统的无源消弧线圈,未涉及有功功率的控制,且因直流侧电压支撑不足,功率补偿将受接地故障消弧的影响而发生波动。

本文提出一种基于多变量解耦控制的配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法。基于直流侧并接储能元件的级联H桥多电平变流器,研究多变量解耦控制算法,实现同一台FPEE集成多种功能,包括配电网有功功率、无功功率双向流动控制及单相接地故障柔性消弧等功能的同时实现,从而提高FPEE的使用效率。利用配电网集成化柔性消弧原理,实现FPEE输出电流在 $dq0$ 坐标系下的独立调节。其中,在 d 、 q 轴上实现配电网有功、无功功率的双向流动控制,在 0 轴上实现单相接地故障柔性消弧控制。本文所提的FPEE的直流侧储能元件并接有分布式电源,有助于在发生单相接地故障时,支撑故障所在相的级联H桥变流器的直流侧电压,保证了FPEE输出功率不受接地故障消弧的影响。仿真结果验证了本文所提方法的正确性和可行性。

1 配电网集成化柔性消弧原理

1.1 带FPEE的中性点不接地配电网

带FPEE的中性点不接地配电网的拓扑结构如图1所示。图中,FPEE由三相级联H桥变流器构成,其交流侧的一端经高压开关K直接挂接于配电

收稿日期:2020-10-23;修回日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677030)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677030)

网,另一端采用星形联结经开关 K_1 接地;FPFE中的每相变流器包含 n 个H桥单元,每个单元的直流侧接一定容量的储能元件,并根据需要将分布式电源并接于储能元件。此时的H桥单元直流侧相当于并接一定容量的电源,可为FPFE提供持续的功率来源; $e_X(X=A,B,C)$ 为配电网三相等效电源电动势; v_0 为中性点电压; v_{GX} 为FPFE的并网点电压; i_{iX} 为FPFE的输出电流; v_{HX} 为三相级联H桥变流器输出电压; i_f 为故障电流; v_f 为故障点电压; r_X, c_X 分别为配电网单相对地泄漏电阻和对地电容; R_H 为FPFE与配电网之间的等效连接电阻; L_H 为FPFE与配电网之间的连接电感。含多条馈线的配电网可等效变换为图1所示的简单配电网结构。

1.2 有功、无功功率双向流动控制原理

由图1结合基尔霍夫电压定律(KVL)可得:

$$v_{HX} - v_{GX} = R_H i_{iX} + L_H \frac{di_{iX}}{dt} \quad (1)$$

假设配电网三相电源电压对称,则有:

$$\begin{cases} v_{GA} = V_{Gm} \cos(\omega t) \\ v_{GB} = V_{Gm} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ v_{GC} = V_{Gm} \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

对FPFE的并网点电压 v_{GX} 和输出电流 i_{iX} 进行Park变换,分别得到其 d, q 轴分量,如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} v_{Gd} \\ v_{Gq} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_{GA} \\ v_{GB} \\ v_{GC} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{id} \\ i_{iq} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_{iA} \\ i_{iB} \\ i_{iC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: v_{Gd}, v_{Gq} 分别为FPFE的并网点电压的 d 轴分量和 q 轴分量; i_{id}, i_{iq} 分别为FPFE的输出电流的 d 轴分量和 q 轴分量; V_{Gm} 为FPFE的并网点电压的幅值; T 为Park变换矩阵。

利用低通滤波器LPF(Low Pass Filter)的选频特性降低FPFE的并网点电压 v_{GX} 及输出电流 i_{iX} 中的谐波,减少其对配电网电能质量的影响。 v_{Gd} 和 v_{Gq} 经LPF后分别得到 v_d 和 v_q , i_{id} 和 i_{iq} 经LPF后分别得到 i_d 和 i_q 。因此,联立式(2)~(4)并结合三角函数的积化和差公式可得:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_{GA} \\ v_{GB} \\ v_{GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Gm} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_{iA} \\ i_{iB} \\ i_{iC} \end{bmatrix} \quad (5)$$

联立式(1)、(5)可得:

$$\begin{bmatrix} v_{Hd} \\ v_{Hq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_H & -\omega L_H \\ \omega L_H & R_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_H & 0 \\ 0 & L_H \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: v_{Hd}, v_{Hq} 分别为FPFE中级联H桥变流器的输出电压的 d, q 轴分量。

利用瞬时功率理论可求得瞬时有功功率 P 和瞬时无功功率 Q 的关系为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \end{cases} \quad (7)$$

将式(3)代入式(7)化简后可得:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} V_{Gm} i_d \\ Q = -\frac{3}{2} V_{Gm} i_q \end{cases} \quad (8)$$

FPFE的输出电流的 d 轴分量参考值 i_{dref} 为:

$$i_{dref} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{V_{Gm}} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{v_d} \quad (9)$$

同理可得,FPFE的输出电流的 q 轴分量参考值 i_{qref} 为:

$$i_{qref} = -\frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{V_{Gm}} = -\frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{v_d} \quad (10)$$

式中: P_{ref}, Q_{ref} 分别为配电网负荷所需的有功功率、

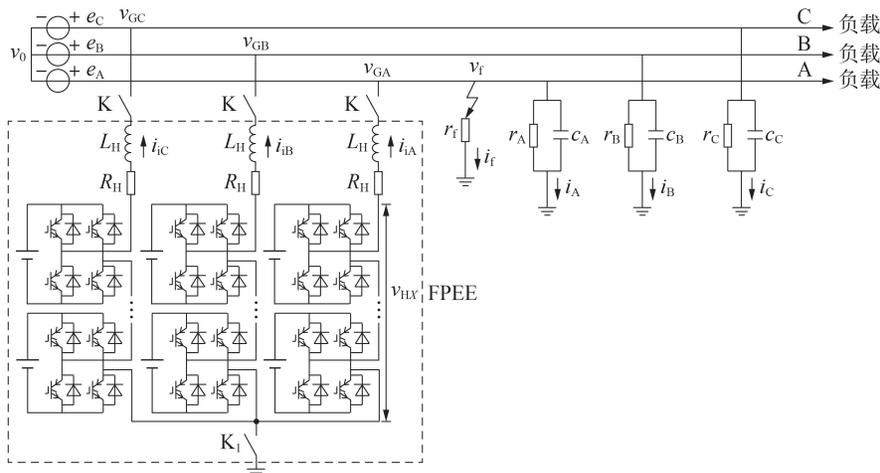


图1 带FPFE的中性点不接地配电网

Fig.1 Neutral point ungrounded distribution network with FPFE

析,令:

$$\begin{cases} v_1 = R_H i_d + L_H \frac{di_d}{dt} \\ v_2 = R_H i_q + L_H \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (19)$$

则由式(6)可得标么值化后的 d 、 q 轴电压分别为:

$$\begin{cases} v_{Hd}^* = v_d^* - \omega L_H i_q^* + v_1^* \\ v_{Hq}^* = v_q^* + \omega L_H i_d^* + v_2^* \end{cases} \quad (20)$$

式中: v_{Hd}^* 、 v_{Hq}^* 、 v_d^* 、 v_q^* 、 i_d^* 、 i_q^* 、 v_1^* 、 v_2^* 分别为对应变量的标么值。

利用变量 v_1 、 v_2 即可实现对 d 、 q 轴电流的解耦,即令:

$$\begin{cases} v_1 = k_{p1}(i_{dref} - i_d) + k_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt \\ v_2 = k_{p2}(i_{qref} - i_q) + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (21)$$

式中: k_{p1} 、 k_{i1} 分别为 d 轴电流的 PI 控制的比例、积分系数; k_{p2} 、 k_{i2} 分别为 q 轴电流的 PI 控制的比例、积分系数。

配电网线路的 A 相发生单相接地故障时的零序网络等效电路如图 3 所示。

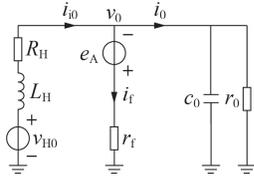


图3 零序网络等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of zero-sequence network

FPEE 的输出电压的 0 轴分量的标么值为:

$$v_0^* = \frac{v_0}{V_{b0}} \quad (22)$$

由图 3 结合 KVL 可得:

$$v_{H0}^* - v_0^* = R_H i_{00}^* + L_H \frac{di_{00}^*}{dt} \quad (23)$$

式中: v_{H0}^* 为 FPEE 中的级联 H 桥变流器的输出电压的 0 轴分量标么值; i_{00}^* 为 FPEE 输出电流的 0 轴分量标么值。令:

$$v_3 = R_H i_{00} + L_H \frac{di_{00}}{dt} \quad (24)$$

则式(23)可写为:

$$v_{H0}^* = v_3^* + v_0^* \quad (25)$$

利用变量 v_3 即可实现对 0 轴电流的解耦,即令:

$$v_3 = k_{p3}(i_{0ref} - i_{00}) + k_{i3} \int (i_{0ref} - i_{00}) dt \quad (26)$$

式中: k_{p3} 与 k_{i3} 分别为 0 轴电流的 PI 控制的比例、积分参数。

FPEE 的控制系统的结构见附录 A 图 A2。为平

衡负荷所需有功功率及无功功率,利用式(12)可得出 FPEE 的输出电流的 d 、 q 轴分量参考值,利用 PI 控制器实现对 FPEE 的输出电压的 d 、 q 轴分量的解耦控制,实现 FPEE 的交直流侧功率双向流动。为实现单相接地故障柔性消弧,以故障相电源电压作为 FPEE 的输出电压的 0 轴分量的电压参考值,利用式(16)计算 FPEE 的输出电流的 0 轴分量参考值,继而由 PI 控制器实现对 FPEE 的输出电压的 0 轴分量的解耦控制。将各轴分量转换成有名值后经 Park 反变换至 abc 坐标系,选用载波移相调制 PSCPWM (Phase-Shifted Carrier PWM) 策略将各控制量转换为调制信号,控制 FPEE 中的级联 H 桥变流器输出补偿电流。

3 仿真分析

3.1 仿真建模

为了验证基于多变量解耦控制的配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法的可行性,采用仿真软件 MATLAB / Simulink 对其进行仿真,搭建如图 1 所示的经 FPEE 接地的配电网仿真模型,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
系统线电压 / kV	10.5	三相对地电容 / μF	21
FPEE 额定补偿容量 / (MV·A)	4	三相对地泄漏电阻 / k Ω	10
FPEE 级联 H 桥数目	10	低通滤波器截止频率 / Hz	1000
直流侧蓄电池电压 / V	1800	低通滤波器阻尼因子	1
连接电感 / H	0.01	比例系数	5
等效连接电阻 / Ω	0	积分系数	1
载波频率 / Hz	1000		

3.2 多变量解耦控制效果分析

假定配电网负荷所需的有功功率和无功功率分别为 1 MW 和 1 Mvar,在运行过程中均保持不变。在不同运行工况下,通过软件仿真分析 FPEE 输出的有功功率、无功功率及输出接地故障补偿电流的多变量解耦控制效果。对于单相接地故障,均设定故障过渡电阻为 100 Ω ,故障初相角为 90°。

1) 配电网未发生单相接地故障时,FPEE 输出的有功和无功功率同时变动,此时的控制效果如图 4 所示。图中, P_s 、 Q_s 分别为配电网母线处的有功功率及无功功率。

为了说明正常运行工况下,FPEE 可同时输出有功及无功功率,设置 0.08 s 时 FPEE 输出的有功功率和无功功率分别为 1 MW 和 1 Mvar,负荷所需的有功功率及无功功率均由 FPEE 提供。因此,从 0.08 s 至 FPEE 输出的功率变动时刻 0.15 s,母线处的有功功

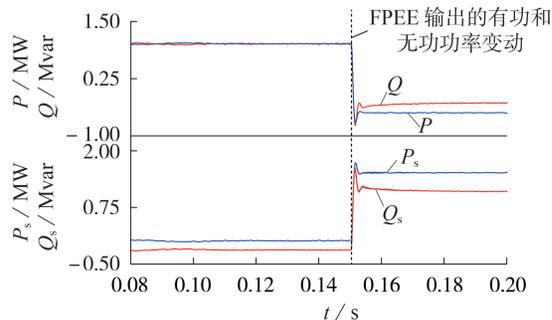
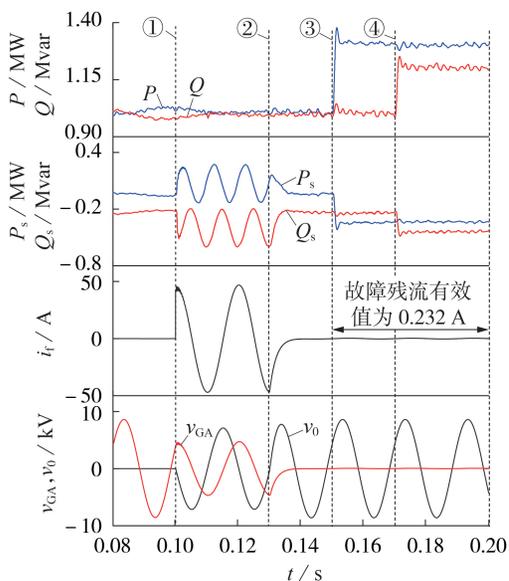


图 4 未发生单相接地故障时,FPEE 输出的有功和无功功率同时变动的控制效果

Fig.4 Control effect when FPEE output active and reactive power change simultaneously, without single-phase grounding fault

率基本为 0,而无功功率出现一个小的负值,其原因是线路对地电容的存在。为充分展示 FPEE 的有功及无功功率的双向流动控制效果,设置 0.15 s 时 FPEE 输出的有功功率由 1 MW 变为 -0.5 MW,输出的无功功率由 1 Mvar 变为 -0.3 Mvar。因负荷消耗功率保持不变,从母线处的功率变化可见 FPEE 变动的功率均从主电网吸收。可见,利用多变量解耦可同时实现对有功功率、无功功率的双向流动控制。

2)配电网发生单相接地故障,FPEE 输出单相接地故障补偿电流后,输出的有功和无功功率逐次变动,控制效果如图 5 所示。0.08 s 时 FPEE 输出的有功功率和无功功率分别为 1 MW 和 1 Mvar。0.1 s 时配电网 A 相线路发生单相接地故障,为实现单相



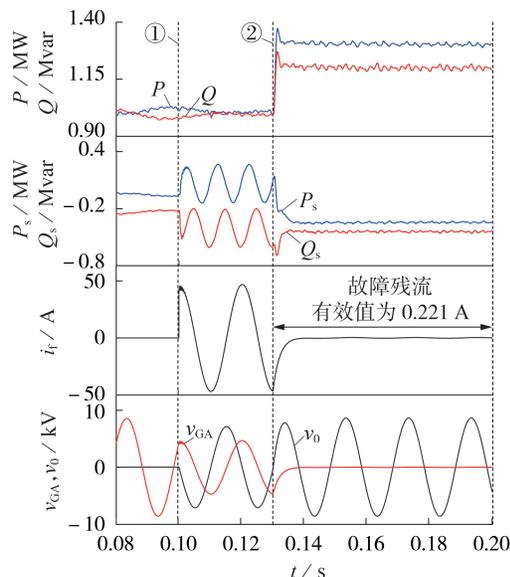
① 故障时刻, ② FPEE 输出单相接地故障补偿电流
③ FPEE 输出的有功功率变动
④ FPEE 输出的无功功率变动

图 5 发生单相接地故障后,FPEE 输出功率逐次变动的控制效果

Fig.5 Control effect when FPEE output power successively changes, after single-phase grounding fault

地故障消弧,0.13 s 时控制 FPEE 输出单相接地故障补偿电流,控制后的故障残流有效值为 0.232 A。为证明发生单相接地故障后,FPEE 的有功功率和无功功率仍可解耦控制,且便于波形的展示,0.15 s 时控制 FPEE 输出的有功功率由 1 MW 增加至 1.3 MW;0.17 s 时控制 FPEE 输出的无功功率由 1 Mvar 增加至 1.2 Mvar。因负荷消耗功率保持不变,从母线处的功率变化可见 FPEE 增加输出的功率均注入主电网。

3)配电网发生单相接地故障后,FPEE 输出单相接地故障补偿电流,同时其输出的有功和无功功率变动,控制效果如图 6 所示。0.08 s 时 FPEE 输出的有功功率和无功功率分别为 1 MW 和 1 Mvar,负荷所需的有功功率及无功功率均由 FPEE 提供。0.1 s 时配电网 A 相线路发生单相接地故障,为实现单相接地故障消弧,0.13 s 时控制 FPEE 输出单相接地故障补偿电流,控制后故障残流有效值为 0.221 A。为证明 FPEE 的多种功能可同时实现且互不影响,且便于波形的展示,在 FPEE 输出单相接地故障补偿电流的同时,控制 FPEE 输出的有功功率由 1 MW 增加至 1.3 MW 以及输出的无功功率由 1 Mvar 增加至 1.2 Mvar。因负荷消耗功率保持不变,从母线处的功率变化可见,FPEE 增加输出的功率均注入主电网。利用多变量解耦可同时实现对有功功率、无功功率及单相接地故障柔性消弧的独立控制。



① 故障时刻
② FPEE 输出单相接地故障补偿电流,同时输出的有功、无功功率变动

图 6 发生单相接地故障后,FPEE 输出接地故障补偿电流的同时输出有功和无功功率变动的控制效果

Fig.6 Control effect when FPEE outputting grounding fault compensation current while active and reactive power changes, after single-phase grounding fault

综上所述,基于配电网单相接地故障集成化柔性消弧原理,FPEE 可实现不同工况下的有功功率、

无功功率双向流动和单相接地故障柔性消弧的解耦控制。

3.3 配电网单相接地故障消弧效果分析

为了进一步证明本文所提方法中配电网单相接地故障电流消弧方法的可行性,利用3.1节所搭建的仿真模型,验证不同故障过渡电阻情况下的消弧效果。设置0.04 s时发生A相接地故障,故障初相角均为 90° ,0.08 s时FPEE输出单相接地故障补偿电流。故障相经不同故障过渡电阻接地时,电压、电流波形如图7与附录A图A3、A4所示,投入FPEE补偿的消弧效果如表2所示。

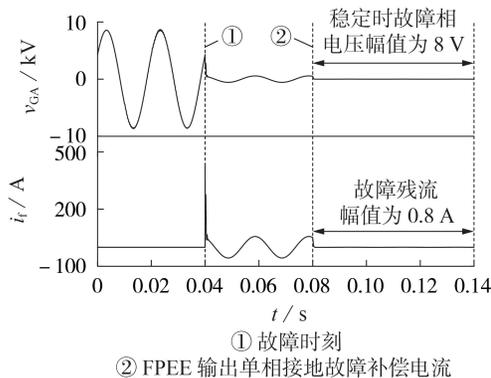


图7 发生经 $10\ \Omega$ 过渡电阻单相接地故障时的电压、电流波形

Fig.7 Voltage and current waveforms under single-phase grounding fault with $10\ \Omega$ transition resistance

表2 不同过渡电阻条件下的消弧效果

Table 2 Arc suppression effect under different transition resistance conditions

过渡电阻/ Ω	补偿前故障电流幅值/A	补偿后故障电流幅值/A	故障电流抑制比/%
10	56.540	0.789	98.60
100	46.930	0.416	99.11
500	17.310	0.157	99.09
1000	8.975	0.045	99.50

由图7、A3、A4可见,不同过渡电阻条件下,FPEE都能输出单相接地故障补偿电流,故障残流幅值都不大于1 A,可有效抑制故障电弧的重燃,消除单相接地故障;低、中过渡电阻条件下,本文所提方法的响应速度较快,而高阻情况下,本文所提方法响应速度较慢,但依然能够保证可靠消弧。由表2可见,不同的过渡电阻条件下,本文所提方法都能实现98.6%以上的故障电流抑制比,验证了配电网单相接地故障电流消弧方法的可行性。此外,文献[12]采用的装备的直流侧不含直流电源,随着STATCOM直流侧的电容有限的能量用于补偿接地故障电流,直流侧电压随之下降,难以持续输出有功功率。而本文所提FPEE的直流侧储能元件并接有分布式电源,可在补偿接地故障电流时,保持储能元件两端的

电压,从而保证FPEE的功率输出不受接地故障消弧影响。

4 结论

本文提出一种基于多变量解耦控制的配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法。理论分析和仿真结果表明:集成化柔性消弧方法将多变量解耦控制方法与电流消弧方法相结合,可实现配电网有功功率、无功功率双向流动控制及单相接地故障柔性消弧功能集成在同一套FPEE中。FPEE采用三相级联H桥变流器结构,无需消弧线圈。此外,所提的FPEE的直流侧储能元件并接有分布式电源,有助于发生单相接地故障时,支撑故障所在相的级联H桥变流器的直流侧电压。本文方法原理清晰,可实现一机多用,有效提高柔性电力电子装备的利用效率。下一步将利用课题组研制的FPEE样机,对提出的配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法进行物理验证。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭谋发,刘世丹,杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):183-190. GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.
- [2] 唐杰,罗安,范瑞祥,等. 新型厂矿企业配电网谐波抑制和无功补偿方案[J]. 电力自动化设备,2007,27(2):39-43. TANG Jie, LUO An, FAN Ruixiang, et al. Harmonic suppression and var compensation of industrial power distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 39-43.
- [3] 朱非白,江道灼,梁一桥. 基于T型三电平拓扑的新型电能质量补偿器[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):149-156. ZHU Feibai, JIANG Daozhuo, LIANG Yiqiao. Novel power quality compensator based on T-type three-level topology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 149-156.
- [4] 高鹏程,王蕾,李立生,等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):190-196. GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.
- [5] 王涛,刘雪飞,郑重,等. 基于潮流线性化的分布式发电选址定容新算法[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):117-128. WANG Tao, LIU Xuefei, ZHENG Zhong, et al. Novel locating and sizing algorithm for distributed generation based on power flow linearization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 117-128.
- [6] RAJKIRAN S, SEYEDFOAD T, TAN N M L, et al. Experimental verification of a battery energy storage system for integration with photovoltaic generators [J]. Advances in Power Electronics, 2017, 2017: 1-10.
- [7] 李毅,杨公训,安新. 基于CAN总线的分布式电网消弧选线系统[J]. 电力自动化设备,2006,26(6):60-62.

- LI Yi, YANG Gongxun, AN Xin. Distributed arc-extinction and grounding detection system based on CAN bus[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 60-62.
- [8] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.
- ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.
- [9] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联 H 桥变流器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2677-2684.
- GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, et al. A novel approach for fault arc extinguishing and feeder selection in distribution networks based on single-phase cascade H-Bridge converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2677-2684.
- [10] CHENG Y, QIAN C, CROW M L, et al. A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converters for a STATCOM with energy storage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1512-1521.
- [11] 王朋, 田翠华, 陈柏超, 等. 基于新型磁控消弧线圈的电磁混合消弧及配合选线新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 175-183.
- WANG Peng, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Electromagnetic hybrid arc suppression and a novel method of feeder selection based on the novel magnetic controlled Petersen coil [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 175-183.
- [12] 周兴达, 陆帅. 一种基于消弧线圈和静止同步补偿器协同作用的配电网消弧结构与与方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1251-1262.
- ZHOU Xingda, LU Shuai. An arc-suppression method based on the coordinated operation of the Petersen coil and the static synchronous compensator in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1251-1262.
- [13] 郭谋发, 游建章, 张伟骏, 等. 基于三相级联 H 桥变流器的配电网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 11-22.
- GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 11-22.
- [14] 张纯江, 赵晓君, 郭忠南, 等. 二阶广义积分器的三种改进结构及其锁相环应用对比分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 42-49.
- ZHANG Chunjiang, ZHAO Xiaojun, GUO Zhongnan, et al. Three improved second order generalized integrators and the comparative analysis in phase locked loop application [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 42-49.

作者简介:



郭谋发

化技术。

郭谋发(1973—),男,福建福清人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统自动化(E-mail:gmf@fzu.edu.cn);

郭彩虹(1994—),女,福建漳州人,硕士研究生,主要研究方向为配电网及其自动化技术;

郑泽胤(1991—),男,福建闽侯人,博士研究生,主要研究方向为配电网及其自动

(编辑 任思思)

Integrated flexible arc suppression method based on multi-variable decoupling control for single-phase grounding fault in distribution network

GUO Moufa, GUO Caihong, ZHENG Zeyin

(School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: With the increasing application of power electronic equipments such as static reactive power compensation devices, flexible arc suppression devices and high-power inverters, the development of flexible distribution network has been accelerated. However, the existing power electronic equipments have problems such as single function and high cost. Based on the direct-connected cascaded H-bridge converter connected in parallel with the energy storage element at DC side, and combining the multi-variable decoupling control method with current arc suppression method, the output current of the flexible power electronic equipment can be independently adjusted in the $dq0$ coordinate system. Thereby, a single set of flexible power electronic equipment can be integrated with bidirectional active and reactive power flow control of the distribution network, and flexible arc suppression of single-phase grounding fault, which will effectively improve the utilization efficiency of power electronic equipments. Theoretical analysis and simulative results of power control and single-phase grounding fault arc suppression modeling verify the feasibility of the proposed method.

Key words: distribution network; single-phase grounding fault; integrated flexible arc suppression method; multi-variable decoupling control; current arc suppression method; active power; reactive power

附录 A

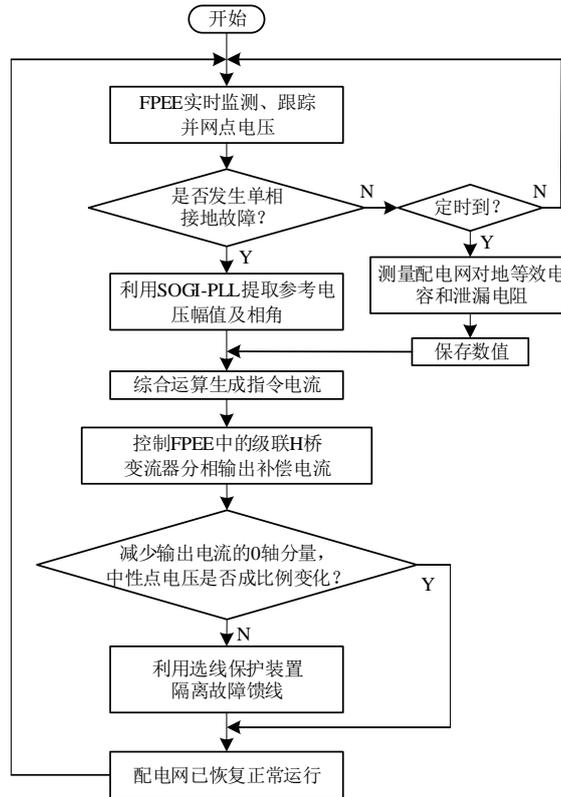


图 A1 配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法流程图

Fig.A1 Flowchart of integrated flexible arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network

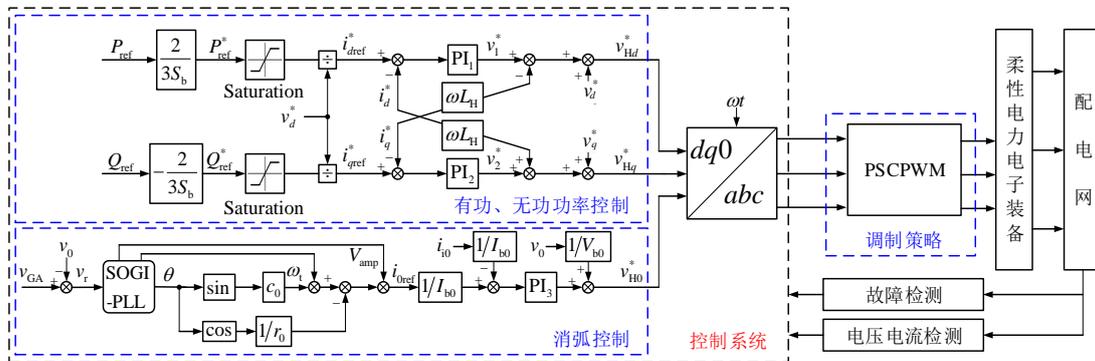


图 A2 FPEE 的控制系统结构

Fig.A2 Structure of control system of FPEE

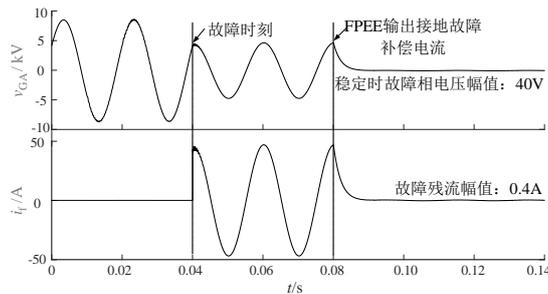


图 A3 发生经 100Ω 过渡电阻单相接地故障时的电压、电流波形

Fig.A3 Voltage and current waveforms under single-phase grounding fault with 100Ω transition resistance

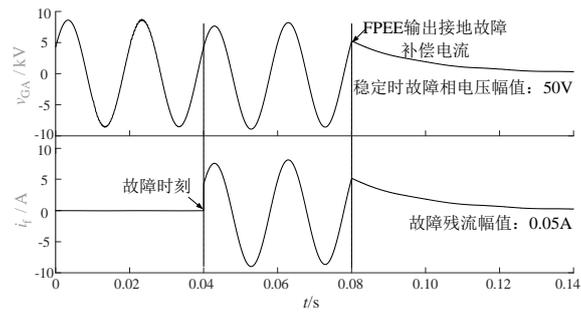


图 A4 发生经 1000Ω 过渡电阻单相接地故障时的电压、电流波形

Fig.A4 Voltage and current waveforms single-phase grounding fault with 1000Ω transition resistance