

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231264

适应于逆变型风电接入系统的改进故障序分量选相方法

郎学毅¹, 汤亚芳¹, 熊炜¹, 周吉¹, 郭元萍²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 针对传统故障序分量选相元件在逆变型风电接入系统中可靠性较低的问题, 提出了一种改进的故障序分量选相方法。首先, 分析在最新风电场低电压穿越策略下, 风电侧的故障序阻抗特性及传统故障序分量选相元件的适应性。然后, 利用负正序、负零序阻抗相位差等效正负序、零负序电流分支系数相位差, 以补偿传统序分量选相判据的相角误差。最后, 采用补偿后的故障序电流相位差作为选相判据, 实现了故障相的判别。同时通过调整零负序选相分区, 使其具有较好的耐过渡电阻能力。仿真实验表明, 在不同故障类型、故障位置和过渡电阻下改进选相方法均能可靠地选出故障相。

关键词: 逆变型风电; 故障序分量; 故障选相; 序阻抗

An improved fault sequence component phase selection method adapted to an inverter-interfaced wind farm access system

LANG Xueyi¹, TANG Yafang¹, XIONG Wei¹, ZHOU Ji¹, GUO Yuanping²

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: To address the low reliability of traditional fault sequence component phase selection in an inverter-interfaced wind power access system, an improved fault sequence component phase selection method is proposed. First, the fault sequence impedance characteristics of the wind power side and the adaptability of the traditional fault sequence component phase selection element are analyzed in the latest low voltage-through strategy of a wind farm. Then negative positive sequence and negative zero impedance phase difference are used to the equivalent positive and negative sequence current branch coefficient phase difference so that the phase angle error of the traditional sequence compensating phase selection criterion can be compensated. Finally, the compensated fault sequence current phase difference is used as the phase selection criterion, and the fault phase identification is realized. The method has better resistance to transition resistance by adjusting the zero negative sequence phase selection partition. The simulation results show that the improved method can reliably select the fault phase with various fault types, different fault locations and transition resistance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52367005).

Key words: inverter-interfaced wind power; fault sequence component; fault phase selection; sequence impedance

0 引言

为了减少化石能源的过度消耗, 风电技术在世界范围内得到了广泛应用^[1-2]。风电系统的高度电力电子化导致其故障暂态特性不同于传统能源^[3-4], 传统保护元件在风电接入系统中存在适应性问题^[5-7]。选相元件作为继电保护基础元件之一, 该元件正确

动作对于自动重合闸和距离保护故障相判别至关重要^[8], 因此亟需研究适用于风电系统的选相元件。

目前应用较为广泛的选相元件为故障序分量选相元件与电流突变量选相元件。受到风电系统弱馈特性^[9-11]及低电压穿越策略^[12-14]的影响, 风电侧正负序阻抗幅值相差较大、相位关系随时间波动^[15], 导致传统的选相元件在应用风电接入系统时存在选相错误的问题^[16-17]。

针对传统选相元件在风电接入系统的不适应问

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52367005)

题,文献[18]通过对电流突变量进行补偿,改进了传统电流突变量选相元件。文献[19]通过对故障电流序分量加入故障电压来消除风电侧正负序阻抗相位不等带来的影响。文献[20]针对双馈机组风电场故障特性引起的故障电压相位偏移进行修正,并利用保护安装处电压序分量进行选相。文献[21]利用相电压与相间电压突变量之间的比值关系进行选相。文献[22]将电流量与电压量相结合进行选相,使得该选相元件具有更广的适用范围。文献[23]针对逆变型风电的常规选相不适应,提出将低电压与测量阻抗相结合的选相判据,但是该方法并未考虑过渡电阻的影响。当存在过渡电阻时,所测量的阻抗存在一个故障附加阻抗,进而偏离实际阻抗,导致选相失败。文献[24-27]提出了一些消除故障附加阻抗的算法,通过特定的假设条件去间接求取实际测量阻抗,但是此类算法过于复杂。

目前风电选相方案大多针对以双馈感应发电机(doubly fed induction generator, DFIG)为代表的异步型电源,而对于永磁同步发电机(permanent magnetic synchronous-generator, PMSG)为代表的逆变型电源(inverter-interfaced generation, IIG)却鲜有研究。本文以最新的风电场低电压穿越策略为逆变型风电系统的低穿策略,并对其故障序阻抗特性开展理论分析。利用负正序、负零序阻抗相位差等效正负序、零负序电流分支系数相位差,以补偿传统序分量选相判据的相角误差,进而改进传统的故障序分量选相元件,提升选相方案在风电系统中的适应性,使之具备更强的耐过渡电阻能力。开展多种故障场景的仿真实验,以验证改进方案的可行性。

1 逆变型电源的典型控制策略

在正常情况下,逆变器采用PQ控制策略^[27],电网电压矢量定向于 d 轴,输出的有功电流参考值可由有功功率参考值与并网点电压求得,其输出的无功电流参考值一般设为0,则有功参考电流 I_{d_ref} 为

$$I_{d_ref} = \frac{P_{ref}}{U_{PCC}} \quad (1)$$

式中: P_{ref} 为有功功率参考值; U_{PCC} 为并网点电压矢量幅值。

根据风电场低电压穿越最新国家标准^[28],在对称性短路情况下,风电场动态无功电流增量响应并网点电压变化,并满足式(2)。

$$I = K_1 \times (0.9 - U) \times I_N, 0.2 \leq U \leq 0.9 \quad (2)$$

式中: I 为风电场注入的动态无功电流; K_1 为风电

场动态无功电流比例系数; U 为风电场并网点电压标幺值; I_N 为风电场额定电流。

对于不对称故障,要求风电场应向电网注入正序动态无功电流支撑正序电压恢复,从系统吸收负序无功电流抑制负序电压升高。风电场动态无功电流增量响应并网点电压变化,并满足式(3)。

$$\begin{cases} I^+ = K_2^+ \times (0.9 - U^+) \times I_N, 0.2 \leq U^+ \leq 0.9 \\ I^- = K_2^- \times U^- \times I_N \end{cases} \quad (3)$$

式中: I^+ 为风电场注入的正序动态无功电流; I^- 为风电场吸收的负序动态无功电流; K_2^+ 为风电场动态正序无功电流比例系数; K_2^- 为风电场动态负序无功电流比例系数; U^+ 为风电场并网点正序电压标幺值; U^- 为风电场并网点负序电压标幺值。

2 序分量选相元件及动作特性分析

序分量选相元件是利用保护装置处正、负序和零、负序电流故障分量之间的相位关系来构成选相的元件。

在不同短路故障下,保护装置处的故障零、负序电流相位差 $\alpha = \arg(\dot{I}_0 / \dot{I}_2)$ 以及故障正、负序电流相位差 $\beta = \arg(\dot{I}_1 / \dot{I}_2)$ 之间的关系如表1所示,其选相原理流程如图1所示。首先通过 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 的幅值关系判断故障类型、再结合 α 、 β 的取值来确定具体的故障相。

表1 故障分量之间相位差与故障类型之间的关系

Table 1 Relationship between fault component phase differences and fault types

故障类型	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$
A 相接地故障(AG)	0	0
B 相接地故障(BG)	120	-120
C 相接地故障(CG)	-120	120
AB 相间故障(AB)	—	-60
BC 相间故障(BC)	—	180
CA 相间故障(CA)	—	60
AB 两相接地故障(ABG)	-120	-60
BC 两相接地故障(BCG)	0	180
CA 两相接地故障(CAG)	120	60

由表1可知,每一个故障类型的 α 、 β 都应具有一定的裕度角,其中 α 的裕度角为 $\pm 60^\circ$,判定故障为相间不接地故障时, β 的裕度角为 $\pm 60^\circ$,当判定故障为单相接地故障或相间接地故障时, β 的裕度角为 $\pm 90^\circ$ 。

对于序分量选相元件,其定义的 α 、 β 是基于故障点处的相位关系;对于常规系统,因为其正负

序阻抗相等, 使得常规系统侧保护安装处与故障点处具有相似的相位关系, 因此可以使用故障序分量选相方法。接下来将对风电侧故障选相动作特性进行研究分析。

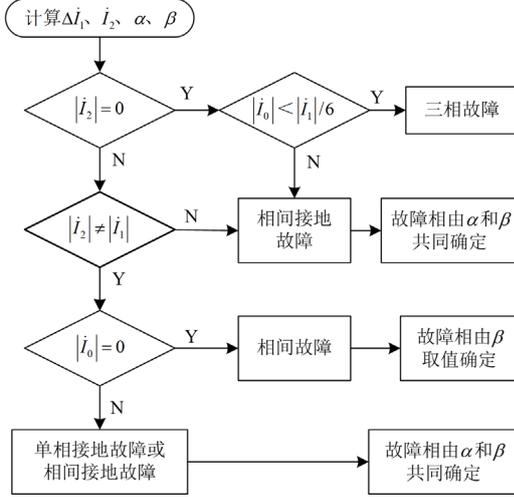


图1 序分量选相元件选相流程

Fig. 1 Phase selection process of sequence component phase selector

图2为典型逆变型风电侧并网模型, 其中N侧为逆变型风电侧, M侧为系统侧。

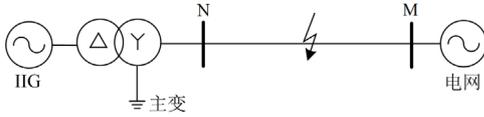


图2 逆变型风电场并网模型

Fig. 2 Inverter-interfaced wind farm grid-connected model

常规电网是线性系统, 故可以利用叠加原理将故障时的状态等效分解为非故障状态和故障状态附加网络。其中故障附加网络是由系统发生故障时的全量减去故障前的正常分量得到的。风电系统内阻在故障前后会随着故障条件、控制方法的改变而改变, 因此故障时将无法分解出故障分量网络。对于风电侧母线N处的保护, 其动作特性是由N侧的故障电压 $\Delta\dot{U}_N$ 、故障电流 $\Delta\dot{I}_N$ 决定。为便于分析风电特性对基于故障分量的保护特性的影响, 假设风电系统故障前后内阻不变, 由此在故障时, 可分解出图3所示故障各序分量图。

图3为对应的正、负、零序故障网络图。图中: 下标 $k=1, 2, 0$ 表示正序、负序、零序分量; Z_{Nk} 并非风电侧真实序阻抗, 可认为其为风电侧的计算阻抗, 仅代表保护安装处故障分量电压和故障分量

电流的关系; Z_{Mk} 为电网侧各序等值阻抗; Z_{LNk} 、 Z_{LMk} 分别为N侧、M侧保护安装处到故障点线路各序等值阻抗; i_{Nk} 、 i_{Mk} 分别为逆变型风电侧、系统侧的故障电流各序分量; i_{fk} 、 \dot{U}_{fk} 分别为故障点电流、电压各序分量。

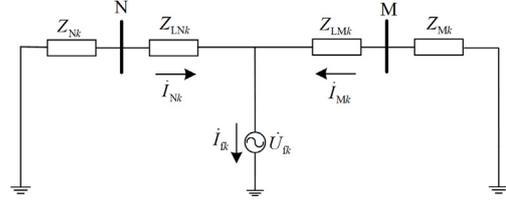


图3 正、负、零序故障网络图

Fig. 3 Positive-sequence, negative-sequence, and zero-sequence fault networks

从图3可以看出, 风电侧N端的关系可以表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_{N1} = C_{N1} \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_{N2} = C_{N2} \dot{I}_{f2} \\ \dot{I}_{N0} = C_{N0} \dot{I}_{f0} \end{cases} \quad (4)$$

式中, C_{Nk} ($k=1, 2, 0$) 为正、负、零序电流分支系数, 其表达式为

$$\begin{cases} C_{N1} = \frac{Z_{M1} + Z_{LM1}}{Z_{N1} + Z_{M1} + Z_{LN1} + Z_{LM1}} \\ C_{N2} = \frac{Z_{M2} + Z_{LM2}}{Z_{N2} + Z_{M2} + Z_{LN2} + Z_{LM2}} \\ C_{N0} = \frac{Z_{M0} + Z_{LM0}}{Z_{N0} + Z_{M0} + Z_{LN0} + Z_{LM0}} \end{cases} \quad (5)$$

在风电侧, 其零负序电流相位差 α 以及正负序电流相位差 β 可表示为

$$\begin{cases} \alpha = \arg\left(\frac{\dot{I}_{N0}}{\dot{I}_{N2}}\right) = \arg\left(\frac{C_{N0}}{C_{N2}}\right) + \arg\left(\frac{\dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{f2}}\right) \\ \beta = \arg\left(\frac{\dot{I}_{N1}}{\dot{I}_{N2}}\right) = \arg\left(\frac{C_{N1}}{C_{N2}}\right) + \arg\left(\frac{\dot{I}_{f1}}{\dot{I}_{f2}}\right) \end{cases} \quad (6)$$

以A相接地为例, 此时 α 的裕度角为 $\pm 60^\circ$, β 的裕度角为 $\pm 90^\circ$, 则结合式(6)有

$$\begin{cases} -60^\circ \leq \arg\left(\frac{C_{N0}}{C_{N2}}\right) \leq 60^\circ \\ -90^\circ \leq \arg\left(\frac{C_{N1}}{C_{N2}}\right) \leq 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

对于风电侧正负序、零负序电流分支系数的相位差 $\angle k_{C12}$ 、 $\angle k_{C02}$ 为

$$\begin{cases} \angle k_{C12} = \arg\left(\frac{C_{N1}}{C_{N2}}\right) = \arg\left(\frac{Z_{N2} + Z_{M2} + Z_{LN2} + Z_{LM2}}{Z_{N1} + Z_{M1} + Z_{LN1} + Z_{LM1}}\right) \\ \angle k_{C02} = \arg\left(\frac{C_{N0}}{C_{N2}}\right) = \arg\left(\frac{Z_{N2} + Z_{M2} + Z_{LN2} + Z_{LM2}}{Z_{N0} + Z_{M0} + Z_{LN0} + Z_{LM0}}\right) \end{cases} \quad (8)$$

对于短路电流, 由于受到变流器限流的影响, 逆变型风电系统输出的故障电流不超过额定电流的 1.5 倍, 出现弱惯性, 因此导致风电系统的正负序阻抗远大于系统侧以及线路的正负序阻抗。

本文是利用风电侧保护安装处所测得的数据进行处理分析, 进而实现故障选相。由于风电侧主变中性点直接接地, 式(8)中风电侧零序阻抗 Z_{N0} 为保护安装处零序阻抗的测量值, 只包含主变的零序阻抗, 风电场并不提供零序阻抗, 因此 Z_{N0} 不需要考虑风电场零序阻抗, 同时对于变压器零序阻抗相位 $\arg(Z_{N0})$, 可直接近似等于 90° 。因此式(8)可改写为

$$\begin{cases} \angle k_{C12} \approx \arg\left(\frac{Z_{N2}}{Z_{N1}}\right) \\ \angle k_{C02} \approx \arg\left(\frac{Z_{N2}}{90^\circ}\right) \end{cases} \quad (9)$$

由图 3 可知, 风电侧等效正负序阻抗 Z_{N1} 、 Z_{N2} 如式(10)所示。

$$\begin{cases} Z_{N1} = -\frac{\dot{U}_{N1}}{\dot{I}_{N1}} \\ Z_{N2} = -\frac{\dot{U}_{N2}}{\dot{I}_{N2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, \dot{U}_{N1} 、 \dot{U}_{N2} 分别为 N 侧保护安装处正、负序故障电压分量。

在发生不对称故障时, 低穿策略为抑制负序电流, 逆变侧采集到的负序电流信号将为 0, 因此对于式(6)中 \dot{I}_{N2} 将不具有实际意义, 逆变侧的 α 、 β 值将有可能落入其他故障类型区间, 导致选相失败。当低穿策略为抑制负序电压升高时, 风电场侧保护安装处的零负序、正负序电流之间的相位关系将不再与故障点保持相同的相位关系, 进而可能导致选相失败。以 A 相接地为例, 仅当 $\angle k_{C12}$ 、 $\angle k_{C02}$ 满足式(7)时, 方能正确选相, 图 4 为 A 相接地短路时 $\angle k_{C12}$ 相位关系图, 可以看出 $\angle k_{C12}$ 超出了式(7)中裕度角的范围, 因此结合式(7)一式(9)可知, 由于正负序阻抗相位差异较大, 导致选相判据 β 超过了裕度角, 因此风电侧将错误选相。

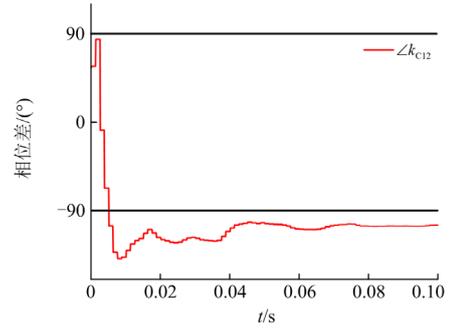


图 4 发生 AG 故障时的正负序电流分支系数相位差
Fig. 4 Phase difference of positive and negative sequence current branch coefficients when AG fault occurs

3 基于相角补偿的故障序分量选相元件

3.1 改进方案

根据前述分析, 导致风电侧序分量选相元件不能正确动作的主要原因是风电侧等效正负序阻抗角差异较大。因此可以考虑消除正负序等效阻抗的影响, 以改善选相元件的动作特性。

已知:

$$\begin{cases} \angle k_{C12} = \arg\left(\frac{C_{N1}}{C_{N2}}\right) \approx \arg\left(\frac{Z_{N2}}{Z_{N1}}\right) \\ \angle k_{C02} = \arg\left(\frac{C_{N0}}{C_{N2}}\right) \approx \arg\left(\frac{Z_{N2}}{90^\circ}\right) \end{cases} \quad (11)$$

等效正负序阻抗 Z_{N1} 、 Z_{N2} 可由风电侧保护安装处所测正负序电压与电流求得, 等效零序阻抗角可直接近似等于 90° 。

因此可定义

$$\begin{cases} \alpha' = \arg\left(\frac{Z_{N2}}{90^\circ}\right) \\ \beta' = \arg\left(\frac{Z_{N2}}{Z_{N1}}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: α' 表示风电场侧保护安装处零负序电流分支系数相位差; β' 表示风电场侧保护安装处正负序电流分支系数相位差。

结合式(6)有

$$\begin{cases} \alpha - \alpha' = \arg\left(\frac{\dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{f2}}\right) \\ \beta - \beta' = \arg\left(\frac{\dot{I}_{f1}}{\dot{I}_{f2}}\right) \end{cases} \quad (13)$$

基于此, 新的选相方法步骤如下述。

- 1) 利用式(10)计算出风电侧等效正负序阻抗 Z_{N1} 、 Z_{N2} 。
- 2) 利用式(12)计算出零负序、正负序分支系数

相位差 α' 、 β' 。

3) 结合式(13)用 α' 、 β' 对风电侧的零负序、正负序电流相位差 α 、 β 进行补偿后得到 α'' 、 β'' , 即

$$\begin{cases} \alpha'' = \alpha - \alpha' \\ \beta'' = \beta - \beta' \end{cases} \quad (14)$$

4) 通过故障序电流幅值的关系, 判定故障类型为何种故障。

5) 最后利用补偿后的 α'' 、 β'' 作为选相判据, 确定故障相。

改进后的正负序故障电流选相判据由原来的 \dot{I}_{N1} 与 \dot{I}_{N2} 的相位差变成了 \dot{I}_{N1} 与 \dot{I}_{N2} 的相位差减去 Z_{N2} 与 Z_{N1} 的相位差; 零负序故障电流选相判据由 \dot{I}_{N0} 与 \dot{I}_{N2} 的相位差变成了 \dot{I}_{N0} 与 \dot{I}_{N2} 相位差减去 Z_{N2} 相位与 90° 之差。由于引入了序阻抗的补偿, 使得补偿后 α'' 、 β'' 能够正确反映出故障点处故障电流的相位关系, 解决了因为正负序阻抗角差异较大导致选相错误的问题。

3.2 过渡电阻的影响

图 5 给出了单相接地、两相、两相接地 3 种经过渡电阻 R_f 短路的复合序网图。其中 Z_1 、 Z_2 、 Z_0 分别为从故障点看进网络的等效正、负、零序阻抗; E 为故障附加电源。

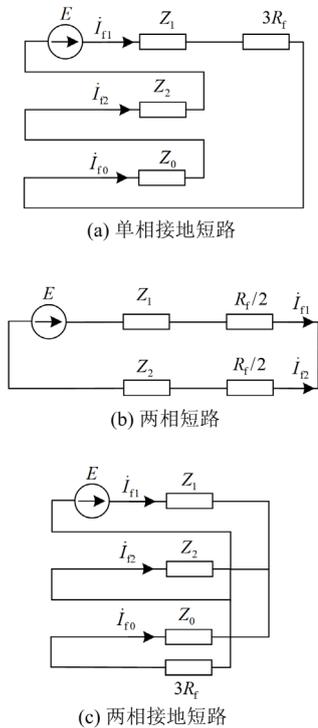


图 5 经过渡电阻短路或接地的复合序网

Fig. 5 Compound sequence network shorted or grounded by transition resistance

由复合序网图 5(a)、图 5(b)可看出, 过渡电阻不会对单相接地以及两相短路情况下的正负序电流相位差、单相接地零负序电流相位差造成影响。

由图 5(b)可得

$$\begin{cases} \frac{\dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{f2}} = \frac{Z_2}{Z_0 + 3R_f} \\ \frac{\dot{I}_{f1}}{\dot{I}_{f2}} = \frac{Z_0 + 3R_f}{Z_2 + Z_0 + 3R_f} \end{cases} \quad (15)$$

补偿后的零负序相位差 α'' 、正负序相位差 β'' 表示为

$$\begin{cases} \alpha'' = \arg\left(\frac{\dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{f2}}\right) = \arg\left(\frac{Z_2}{Z_0 + 3R_f}\right) \\ \beta'' = \arg\left(\frac{\dot{I}_{f1}}{\dot{I}_{f2}}\right) = \arg\left(\frac{Z_0 + 3R_f}{Z_2 + Z_0 + 3R_f}\right) \end{cases} \quad (16)$$

从式(16)可以看出, 零负序电流相位差随着过渡电阻 R_f 的增大而单调增大, 且极值为 90° , 将超出两相接地故障时 α'' 的区域, 导致选相结果落入其他相位区间。因此可将 α'' 的区域重新划分, 对应的 A 区变为 $(-30^\circ, +90^\circ)$, B 区变为 $(+90^\circ, +210^\circ)$, C 区变为 $(-150^\circ, -30^\circ)$ 。因为在单相接地与两相短路时, α'' 、 β'' 与过渡电阻无关, 因此改变后的 α'' 区域不会影响这两种类型短路选相的准确性。

4 仿真验证

为验证本文所提出选相方案的可行性与正确性, 在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建如图 1 所示的逆变型风电场仿真模型, 风电场低电压穿越控制策略参照最新国标规定。

在仿真模型中, 风场总容量为 100 MVA。其中单台风机升压变压器变比为 0.69 kV/35 kV, 风机场站变压器变比为 35 kV/220 kV, 容量为 300 MVA。输电线路 MN 长度为 100 km, 单位长度正、负序等值阻抗为 $(0.01781598 + j31388) \Omega/\text{km}$, 单位长度零序等值阻抗为 $(0.2952201 + j1.039898) \Omega/\text{km}$ 。

在 $t=0$ 时, 送出线 MN 上发生 AG 故障, 故障点位置为距离风电侧保护安装 50 km 处。常规系统侧的正、负序阻抗的幅值与相位如图 6 所示, 相位约为 90° , 幅值约为 32Ω 。风电侧正、负序阻抗的幅值与相位如图 7 所示, 正负序阻抗不相等, 且相位随着时间变化。结合图 6、图 7 可以看出, 风电场侧序阻抗较常规系统侧序阻抗要大得多, 上述结论与理论分析相一致。

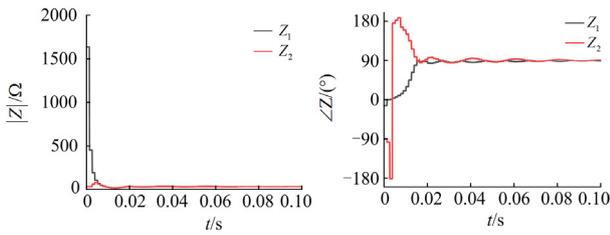


图 6 常规系统侧序阻抗的幅值与相位

Fig. 6 Amplitude and phase of sequence impedances at conventional power side

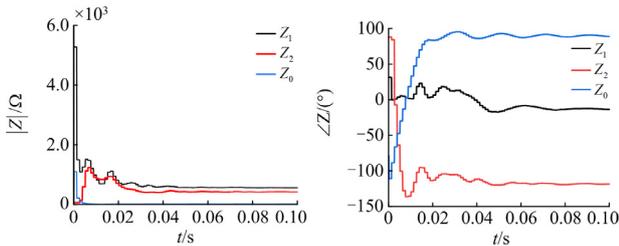


图 7 逆变型风电侧序阻抗的幅值与相位

Fig. 7 Amplitude and phase of sequence impedances at inverter-interfaced wind farm side

图 8 为风电侧传统序分量选相结果，在 0.01 s 后， β 值已经超过了选相裕度，导致选相失败。图 9 为改进后的序分量选相结果，在 0.02 s 后经过补偿以后的零负序电流相位差 α'' 、正负序电流相位差 β'' 在故障周期内可正确稳定地选出故障相。

表 2—表 4 为在逆变型风电场侧不同故障类型、不同过渡电阻以及不同故障位置下所提出选相方案的选相结果。

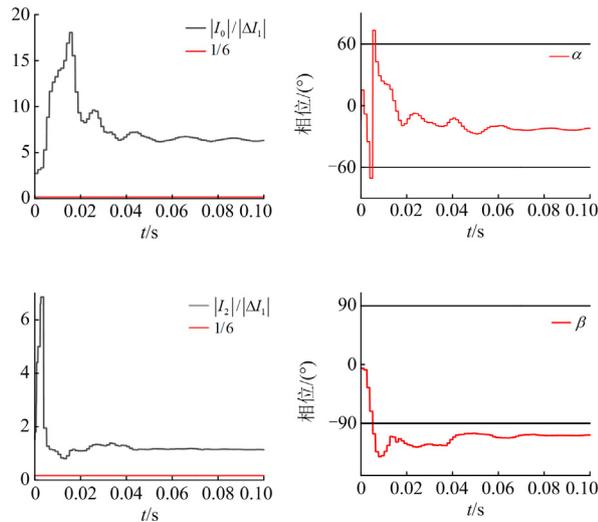


图 8 AG 故障时传统序分量选相结果

Fig. 8 Traditional sequence component phase selection results when AG fault occurs

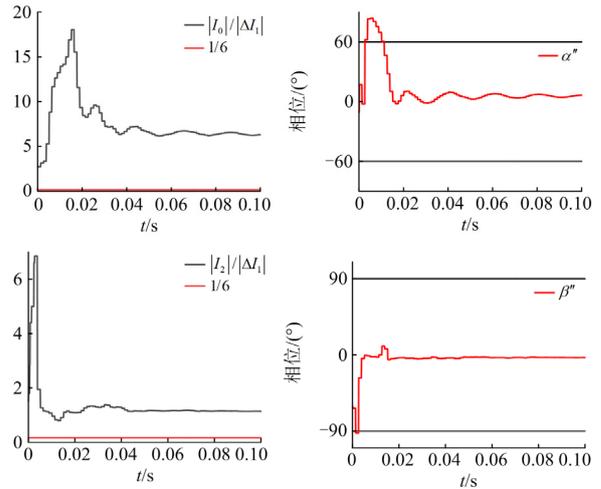


图 9 AG 故障时改进序分量选相结果

Fig. 9 Improved sequence component phase selection results when AG fault occurs

从表 2 可以看出，通过补偿后得到的零负序、正负序电流相位差 α'' 、 β'' 在发生各种接地故障以及相间故障时，其值均在选相裕度之内，实现正确选相，同时基本不受故障位置的影响。

由表 2—表 4 可知，随着故障过渡电阻的增大，单相接地与两相短路故障并不会对 α'' 、 β'' 造成影响，但两相短路接地故障 α'' 会随着过渡电阻的增大而增大，同时 β'' 也会受到过渡电阻的影响，但是影响程度要小于 α'' 。

表 5 为不同方案在不同过渡电阻下的选相结果，其故障位置为 50 km 处。图中(—)表示并未成功选相，可以看出传统选相方案在各种过渡电阻下均选相错误，当不存在过渡电阻时，采用文献[26]中的方法可以成功选相，但是随着过渡电阻的增大，将选相错误，而改进方案可以适应接地故障以及相间故障，且具有一定的抗过渡电阻能力。

表 2 送出线风电侧经不同过渡电阻故障时选相结果

Table 2 Phase selection results when the wind farm side of the transmission line is faulty with different transition resistance

过渡电阻/Ω	故障类型	$\alpha''/(°)$	$\beta''/(°)$	选相结果
0	AG	4.3	-3.4	AG
	BC	—	-177.2	BC
	BCG	3.5	176.8	BCG
50	AG	4.5	3.2	AG
	BC	—	-176.3	BC
	BCG	15.3	-170.5	BCG
100	AG	4.8	3.5	AG
	BC	—	-177.3	BC
	BCG	38.5	-165.6	BCG

表 3 送出线中点处经不同过渡电阻故障时选相结果

Table 3 Phase selection results when the central point of the transmission line is faulty with different transition resistance

过渡电阻/ Ω	故障类型	$\alpha''/(\circ)$	$\beta''/(\circ)$	选相结果
0	AG	4.6	3.7	AG
	BC	—	-178.1	BC
	BCG	3.7	177.6	BCG
50	AG	4.7	3.5	AG
	BC	—	-176.8	BC
	BCG	19.8	-169.8	BCG
100	AG	4.2	3.6	AG
	BC	—	-176.9	BC
	BCG	39.4	-164.8	BCG

表 4 送出线常规系统侧经不同过渡电阻故障时选相结果

Table 4 Phase selection results when the conventional system side of the outgoing line is faulty with different transition resistance

过渡电阻/ Ω	故障类型	$\alpha''/(\circ)$	$\beta''/(\circ)$	选相结果
0	AG	4.7	3.6	AG
	BC	—	-177.5	BC
	BCG	3.9	177.3	BCG
5	AG	4.6	3.7	AG
	BC	—	-176.5	BC
	BCG	20.4	-169.6	BCG
100	AG	4.9	3.8	AG
	BC	—	-176.1	BC
	BCG	39.9	-164.3	BCG

表 5 不同方案选相结果

Table 5 Phase selection results of different schemes

过渡电阻/ Ω	故障类型	传统方案	文献[26]方案	改进方案
0	AG	BCG	AG	AG
	BC	CA	BC	BC
	BCG	AG	BCG	BCG
50	AG	ABG	—	AG
	BC	CA	—	BC
	BCG	CAG	—	BCG
100	AG	ABG	—	AG
	BC	AB	—	BC
	BCG	BG	—	BCG

5 结论

本文针对风电场最新的低电压穿越要求, 分析得出由于正负序阻抗角差异较大, 传统序分量选相判据无法适用于逆变型风电侧的故障选相, 导致在逆变型风电场侧选相错误。

通过风电侧序阻抗特性的理论分析可知, 风电侧零序阻抗相位可等效为 90° , 且正负序阻抗远大于系统侧阻抗以及线路阻抗。通过利用风电侧正序、负零序阻抗相位差去替代正负序、零负序电流分支系数相位差, 进而补偿传统序分量选相判据的相位误差, 同时调整零负序选相分区, 使得补偿后的选相判据可以在风电侧可靠选相, 有较好的耐过渡电阻的能力。

该选相方案中正、负序阻抗分量可以由风电侧阻抗继电器获取, 算法简单, 易于实现, 同时具有较强的耐过渡电阻能力。仿真验证了本文提出方案的可行性与正确性。

参考文献

- [1] 李永丽, 辛双乔, 李涛, 等. 基于多端信息的风电场集电线路单相接地故障定位算法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 2-11.
LI Yongli, XIN Shuangqiao, LI Tao, et al. Single phase grounding fault location algorithm of wind farm collector lines based on multi-terminal information[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 2-11.
- [2] 林圣, 兰菲燕, 刘健, 等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 3-16.
LIN Sheng, LAN Feiyan, LIU Jian, et al. Overview of transient overvoltage mechanism and suppression strategies of high voltage direct current transmission grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 3-16.
- [3] 奚鑫泽, 邢超, 覃日升, 等. 含双馈风力发电系统的配电网短路电流特性[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 921-927.
XI Xinze, XING Chao, QIN Risheng, et al. Characteristics of short-circuit current in distribution network with doubly-fed wind power system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(7): 921-927.
- [4] 何维轩, 樊征臻, 霍姚彤, 等. 基于交叉熵的海上风电经柔性低频送出系统海缆纵联保护[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 38-48.
HE Weixuan, FAN Zhengzhen, HUO Yaotong, et al. Pilot protection scheme of submarine cable in flexible low-frequency transmission system based on cross entropy algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 38-48.
- [5] 余潇, 卜广全, 王姗姗. 风电经柔直孤岛送出交流暂态过电压抑制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 618-625.
YU Xiao, BU Guangquan, WANG Shanshan. Research on transient AC overvoltage suppression strategy of islanded wind power transmission via VSC-HVDC[J]. Power

- Generation Technology, 2022, 43(4): 618-625.
- [6] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [7] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 65-75.
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 65-75.
- [8] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [9] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [10] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-5, 11.
ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-5, 11.
- [11] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [12] HU Jianzu, Chi Yongning, Tian Xinshou, et al. A coordinated and steadily fault ride through strategy under short-circuit fault of the wind power grid connected system based on the grid-forming control[J]. Energy Reports, 2022, 8: 333-341.
- [13] WANG Jian, BEN Yue, ZHANG Jinrui, et al. Low voltage ride-through control strategy for a wind turbine with permanent magnet synchronous generator based on operating simultaneously of rotor energy storage and a discharging resistance[J]. Energy Reports, 2022, 8: 5861-5870.
- [14] 李红, 粟时平, 唐铭泽, 等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 21-32.
LI Hong, SU Shiping, TANG Mingze, et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 21-32.
- [15] QUISPE J C, ORDUÑA E. Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 406-422.
- [16] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 89-95.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 89-95.
- [17] 陈实, 邵能灵, 范春菊, 等. 逆变型电源接入对选相元件的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 106-112.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Influence of inverter-interfaced generator on element of phase selectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 106-112.
- [18] 黄涛, 陆于平. 适用于双馈风电场的改进电流突变量选相元件[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2959-2964.
HUANG Tao, LU Yuping. Improved superimposed current phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2959-2964.
- [19] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 适用于双馈风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 123-128.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 123-128.
- [20] 张俊峰, 高亮, 沈奕菲, 等. 适用于双馈机组风电场的故障电压序分量选相元件[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 136-143.
ZHANG Junfeng, GAO Liang, SHEN Yifei, et al. Fault-sequence element of voltage phase selection applied to DFIG-based wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 136-143.

- [21] XIAO Fan, LIU Dan, JI Xiaotong, et al. Study on a new fault phase selector in interconnection line with wind turbine based on doubly-fed induction generator's wind farm[J]. Energy Reports, 2022, 8: 412-425.
- [22] XU Zhihao, LU Yuping. A novel superimposed phase selection method for transmission line of DFIG-based wind farm[C] // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, September 20-23, 2020, Nanjing, China.
- [23] 陈实. 含新能源发电系统的联络线继电保护方案研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [24] 马伟, 黄晓波, 吴旻昊, 等. 一种抗过渡电阻的阻抗测量改进方案[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1134-1139.
MA Wei, HUANG Xiaobo, WU Minhao, et al. An improved scheme of impedance measurement against transition resistance[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1134-1139.
- [25] 季亮, 张林楠, 姜恩宇, 等. 提升距离保护适应性的新能源主动故障控制研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 22-29.
JI Liang, ZHANG Linnan, JIANG Enyu, et al. Research on new energy active fault control to improve the adaptability of distance protection[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(7): 22-29.
- [26] 马伟, 裘愉涛, 丁冬, 等. 基于阻尼最小二乘法的单相接地故障定位方案[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 3049-3054.
MA Wei, QIU Yutao, DING Dong, et al. Single-phase grounding fault location scheme based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3049-3054.
- [27] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [28] 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S].
Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: onshore wind power: GB/T 19963.1—2021[S].

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2024-01-12

作者简介:

郎学毅(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2669068667@qq.com

汤亚芳(1976—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1560368@qq.com

熊炜(1972—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为配电网供电可靠性。E-mail: 420034562@qq.com

(编辑 张颖)