选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析

王晨清1, 宋国兵1, 汤海雁2, 常仲学1, 李端祯1

(1. 西安交通大学电气工程学院,陕西省西安市 710049; 2. 中国电力科学研究院,北京市 100192)

摘要:对传统选相及方向元件在风电接入系统中的适应性进行了研究分析。传统选相和方向元件 均基于故障序分量网络分析,故障期间风电系统正负序阻抗相差较大且幅值远大于常规电网的特 点使得风电侧正负序电流分支系数具有较大偏差,从而造成了基于正负序电流分支系数近似相等 的传统选相和方向元件并不适用于风电接入系统。PSCAD建模仿真和现场故障录波数据验证了 适应性分析结论。最后基于适应性分析结论给出了风电接入系统的选相和方向元件建议。

关键词:风电系统;故障特征;选相元件;方向元件;保护适应性

0 引言

随着风电技术的日益完善,风电由最初的分布 式接入配电网逐渐转变为大规模集中式接入输电 网,风电接入系统的安全稳定问题成为研究的重 点^[1]。大规模风电接入系统在故障时产生许多异于 传统输电系统的特征,传统继电保护的适应性问题 亟须研究^[2]。

目前已有较多文献研究风电接入带来的保护问题^[3-8],但鲜有文献从继电保护元件本身出发研究其 对风电接入系统的适应性。选相元件是提高保护性 能的基本元件^[9],其正确性是自动重合闸和距离保 护正确动作的前提;方向元件是纵联方向保护的核 心元件,很大程度上决定了整个保护的性能^[9]。传 统选相原理^[9-12]包括相电流差突变量选相和序分量 选相等,因其原理简单可靠、便于实现,目前仍作为 众多风电并网系统的主要选相元件。传统方向原 理^[9-13-14]包括基于相量的方向元件和基于序量的方 向元件等,因其不受负荷影响、动作快、不受过渡电 阻影响等优点而广泛应用于输电系统中。因此,研 究分析传统选相及方向元件在风电接入系统中的适 应性具有重要意义。

本文基于风电系统有别于同步机系统的故障特征,研究分析了传统选相及方向元件在风电接入系统中的适应性。从各元件的基本原理出发,得出选相元件能够正确选相和方向元件能够正确判别方向的基本条件,通过分析在风电系统故障特征下该基

本条件是否满足来判断选相和方向元件的适应性。

1 风电接入系统故障分量网络

传统选相和方向元件的基本原理均基于故障分 量网络,因此首先分析风电接入系统的故障分量网 络特点。

采用对称分量法分析故障附加状态网络,可得 风电接入系统故障附加状态的三序网图如图 1 所 示。图中:W 侧为风电侧,G 侧为常规系统侧;下标 j=0,1,2分别对应零、正、负序; Z_{Wj} 和 Z_{Gj} 分别为两 端系统阻抗, Z_{LWj} 和 Z_{LGj} 分别为故障点 F_1 到W和 G 端的线路序阻抗, R_F 为过渡电阻; ΔI_{Wj} 和 ΔI_{Gj} 分 别为风电和系统侧提供的故障分量短路电流, ΔI_{Fj} 为流入故障点电流, $-\dot{U}_F$ 为故障附加电源。



图 1 风电接入系统的故障附加网络 Fig.1 Additional fault net of wind power integration

风电侧等效正序阻抗 Z_{w1}不稳定,正负序阻抗 Z_{w1}和 Z_{w2}不相等,而常规电源侧等效正负序阻抗 Z_{G1}和 Z_{G2}稳定且相等。由故障附加状态的三序网 分析可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{w_1} = C_{w_1} \Delta \dot{I}_{F_1} \\ \dot{I}_{w_2} = C_{w_2} \dot{I}_{F_2} \\ \dot{I}_{w_0} = C_{w_0} \dot{I}_{F_0} \end{cases}$$
(1)

收稿日期:2015-06-01;修回日期:2015-09-06。 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目 (2012CB215105)。

$$C_{W1} = \frac{Z_{LG1} + Z_{G1}}{Z_{W1} + Z_{LW1} + Z_{G1} + Z_{LG1}}$$

$$C_{W2} = \frac{Z_{LG2} + Z_{G2}}{Z_{W2} + Z_{LW2} + Z_{G2} + Z_{LG2}}$$

$$C_{W0} = \frac{Z_{LG0} + Z_{G0}}{Z_{W0} + Z_{LW0} + Z_{G0} + Z_{LG0}}$$

由式(1)可知,风电侧保护安装处测得的三序故 障分量电流为流入故障点电流乘以分支系数的结 果。由于输电线路和对端常规系统的正负序阻抗近 似相等,即 $Z_{G1} = Z_{G2}, Z_{LW1} = Z_{LW2}, Z_{LG1} = Z_{LG2}, 且$ 远小于风电系统阻抗,因此风电侧故障分量负正序 $电流分支系数比<math>k_{C21}$ 可近似表示为风电系统正负序 阻抗比:

$$k_{C21} = \frac{C_{W2}}{C_{W1}} = \frac{Z_{W1} + Z_{L1} + Z_{G1}}{Z_{W2} + Z_{L2} + Z_{G2}} \approx \frac{Z_{W1}}{Z_{W2}}$$
(2)

由式(2)可知,相差较大且不稳定的风电系统正 负序阻抗将导致风电侧负正序电流分支系数波动较 大,进而影响风电侧保护元件的动作性能。

下面基于风电接入系统故障分量网络的特点分 析传统选相及方向元件的适应性。

2 传统选相元件适应性分析

2.1 相电流差突变量选相元件

相电流差突变量选相元件是利用两相电流差突 变量的幅值特征来进行故障选相的元件。用 Δ*İ*_{AB}, Δ*İ*_{BC}和 Δ*İ*_{CA}分别表示保护安装处两相电流差突变 量,利用对称分量法可得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{AB} = (1-a^2)C_1\Delta \dot{I}_{F1} + (1-a)C_2\dot{I}_{F2} \\ \Delta \dot{I}_{BC} = (a^2-a)C_1\Delta \dot{I}_{F1} + (a-a^2)C_2\dot{I}_{F2} \\ \Delta \dot{I}_{CA} = (a-1)C_1\Delta \dot{I}_{F1} + (a^2-1)C_2\dot{I}_{F2} \end{cases}$$
(3)

式中: C_1 和 C_2 为分支系数; $a = e^{j120^\circ}$ 。

由式(3)可知,相电流差突变量选相元件的本质 是在 $C_2 \approx C_1$ 的情况下,利用 $\Delta \dot{I}_{F1}$ 和 \dot{I}_{F2} 的幅值关 系进行故障相判别。

下面以 A 相接地故障(AG 故障)为例分析相电 流差突变量选相元件在风电接入系统的适应性。

当发生 AG 故障时,由于 $\Delta \dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0}$,故 式(2)为:

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{AB}| = |a^{2} - 1| |C_{1} - aC_{2}| |\Delta \dot{I}_{F1}| \\ |\Delta \dot{I}_{BC}| = |a^{2} - a| |C_{1} - C_{2}| |\Delta \dot{I}_{F1}| \\ |\Delta \dot{I}_{CA}| = |1 - a| |C_{1} - a^{2}C_{2}| |\Delta \dot{I}_{F1}| \end{cases}$$
(4)

若分支系数 C_1 和 C_2 近似相等,由式(4)可得:

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{AB}| = 3 |C_1 \Delta \dot{I}_{F1}| \\ |\Delta \dot{I}_{BC}| = 0 \end{cases}$$
(5)
$$|\Delta \dot{I}_{CA}| = 3 |C_1 \Delta \dot{I}_{F1}| \end{cases}$$

此时按选相流程(见附录 A 图 A1)可正确选为 AG 故障。当 $C_1 \neq C_2$ 时,若按选相流程仍能正确选相,则至少满足:

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{BC}| < |\Delta \dot{I}_{CA}| \\ |\Delta \dot{I}_{BC}| < |\Delta \dot{I}_{AB}| \end{cases}$$
(6)
将式(6)代人式(5),可得

$$-60^{\circ} < \arg\left(\frac{C_2}{C_1}\right) < 60^{\circ} \tag{7}$$

即只有当负正序电流分支系数的相位差在式(7)所示范围内时,相电流差突变量选相元件才能正确选为 AG 故障。

令 $k_{Z12} = Z_{W1}/Z_{W2}$,通过对风电系统的故障特 征分析可知,风电系统正负序阻抗相角差 $\angle k_{Z12}$ 在 故障期间变化较大,最大相差超过 90°。因此根据 式(2)和式(7)可知,风电侧的相电流差突变量选相 元件无法可靠选为 AG 故障。实际上,在 AG 故障 情况下,3 种相电流差突变量的幅值随正负序阻抗 相角差的变化规律如图 2 所示。图中假定 $\sqrt{3} |\Delta I_{F1}C_{W1}| = 1, |C_{W2}/C_{W1}| = 2$ 。



图 2 相电流差突变量随正负序阻抗相角差变化曲线 Fig.2 Curve of fault component phase current difference versus phase angle difference of positive and negative sequence impedance

由图 2 可以看出,由于风电系统正负序阻抗相 角差会在较大范围内变化,3 种相电流差突变量的 幅值关系并不恒定,进而导致选相失败。

而对于常规系统侧,负正序电流分支系数比为:

 $\frac{C_{G1}}{C_{G2}} = \frac{Z_{W1} + Z_{L1} + Z_{G1}}{Z_{W1} + Z_{LW1}} \frac{Z_{W2} + Z_{LW2}}{Z_{W2} + Z_{L2} + Z_{G2}} \approx 1 \quad (8)$

由式(8)可知,常规系统侧正负序电流的分支系数近似相等,因此相电流差突变量选相元件可以正确选相。

2.2 序分量选相元件

序分量选相元件是利用保护安装处正、负、零序

电流故障分量之间的相位和幅值关系来构成选相的 元件,其选相流程见附录 A 图 A2。图中 AG 故障 时 $\alpha = \arg(\Delta \dot{I}_1/\dot{I}_2) = 0^\circ, \beta = \arg(\dot{I}_0/\dot{I}_2) = 0^\circ; BC$ 相间故障时, $\beta = 180^\circ; BCG$ 故障时, $\alpha = 0^\circ, \beta = 180^\circ$ 。 其他相故障时对应的 α 按同类型故障负相序依次相 差 120°, β 按正相序依次相差 120°。如 CAG 故障 时, $\alpha = 120^\circ, \beta = -60^\circ$ 。

根据序分量选相元件的选相流程可知,保护安 装处正、负、零序电流的幅值和相角需在故障期间具 有稳定的幅值和相位关系才能正确选出故障相。同 样保护安装处的序分量电流在故障期间满足式(1), 因流入故障点的各序量电流具有特定的大小关系, 故保护安装处序分量电流间的幅值和相位关系由各 序电流分支系数在故障期间的特性决定。由2.1节 分析可知,风电侧负正序电流分支系数相差较大且 不稳定,因此保护安装处的序分量幅值关系不稳定, 相位关系也随时间而波动,进而导致选相失败。

3 传统方向元件适应性分析

3.1 基于相量故障分量的方向元件

基于相量故障分量的方向元件通过比较各相或 相间电压、电流故障分量之间的相位关系来实现,具 体表示为:

$$0^{\circ} \leqslant \arg \left(-\frac{\Delta \dot{U}_{\phi} - \dot{U}_{0}}{\Delta \dot{I}_{\phi} - \dot{I}_{0}} \right) \leqslant 180^{\circ} \qquad \phi = A, B, C \quad (9)$$

$$0^{\circ} \leqslant \arg \left(-\frac{\Delta U_{\phi\phi}}{\Delta \dot{I}_{\phi\phi}}\right) \leqslant 180^{\circ} \qquad \phi\phi = AB, BC, CA (10)$$

式(9)为相故障分量方向元件,式(10)为相差故 障分量方向元件。本文仅对相差故障分量方向元件 进行适应性分析,相故障分量方向元件的分析结果 可类比相差故障分量方向元件。

令 $\Delta \theta_{\phi\phi} = \arg(-\Delta \dot{U}_{\phi\phi}/\Delta \dot{I}_{\phi\phi})$, 对式(10)采用对称分量法展开可得:

$$\Delta\theta_{\phi\phi} = \arg\left(-\frac{(a^2 - a)\Delta\dot{U}_{W1} + (a - a^2)\dot{U}_{W2}}{(a^2 - a)\Delta\dot{I}_{W1} + (a - a^2)\dot{I}_{W2}}\right) (11)$$

式中以对应相为参考相,如 $\phi\phi$ = BC 时,以A 相 为参考相。

风电侧正向故障时,根据式(11)可得:

$$\Delta \theta_{\phi\phi} = \arg \left(\frac{Z_{w_1} \Delta \dot{I}_{w_1} - Z_{w_2} \dot{I}_{w_2}}{\Delta \dot{I}_{w_1} - \dot{I}_{w_2}} \right)$$
(12)

若故障为 BC 相间故障,则故障点处正负序故 障分量电流满足:

$$\Delta \dot{I}_{F1} = -\dot{I}_{F2}$$
将式(2)和式(13)代人式(12)可得:
(13)

$$\Delta \theta_{\phi\phi} = \arg \left(\frac{2Z_{W1} Z_{W2}}{Z_{W1} + Z_{W2}} \right) = \arg \left(\frac{2k_{Z12} Z_{W2}}{1 + k_{Z12}} \right) \quad (14)$$

由式(14)可以看出,在假定 Z_{w2} 基本稳定的 情况下,风电系统正负序阻抗比 k_{Z12} 的幅值和相位 在故障期间的波动较大,将会导致该类方向元件方 向误判。

3.2 基于序故障分量的方向元件

基于序故障分量的方向元件通过比较各序故障 分量的电压、电流间的相位关系来实现,具体表示 为:

$$0^{\circ} \leqslant_{\operatorname{arg}} \left(-\frac{\Delta \dot{U}_{j}}{\Delta \dot{I}_{j}} \right) \leqslant 180^{\circ}$$
(15)

式中:*j*=1,2,0分别表示正序、负序和零序方向元件。

基于序故障分量的方向元件按式(15)构成方向 判断准则。令 $\Delta \theta_j = \arg(-\Delta \dot{U}_j / \Delta \dot{I}_j)$,风电侧正向 故障时有:

$$\Delta \theta_j = \arg(Z_{W_j}) \tag{16}$$

分析正、负、零序故障分量方向元件的适应性如 下。

1)正序故障分量方向元件

由于风电系统的等值正序阻抗在故障期间幅值 和相位的波动较大,因此根据式(16),Δθ₁相位不稳 定,无法对方向进行正确判断,正序故障分量方向元 件不适应。

2)负序方向元件

由于风电系统主要对正序分量进行控制,因此 除故障点外,不存在负序暂态电势。但风电电源中 的负序回路受控制特性的影响,会因控制的非线性 存在小的波动。因此,风电系统的负序阻抗相对稳 定,从而 $\Delta \theta_2$ 相对稳定,可进行方向判别。

3)零序方向元件

由于零序分量仅与线路网络拓扑相关,与电源 特性无关,因此保护安装处零序阻抗稳定,故 $\Delta\theta_0$ 稳定,可对方向进行正确判断。

综上所述,基于正序故障分量的方向元件在风 电接入系统中存在适应性问题,而负序和零序方向 元件基本不受影响。此外,序故障分量的提取同样 会受风电系统谐波和频率偏移的影响。

4 建模仿真分析

4.1 仿真模型

本文基于主流的风电机组结构、控制策略和参数^[15-17],并按照风电场接入系统标准^[18-19],采用 PSCAD电磁仿真软件分别搭建了具有低电压穿越 能力的双馈风电机组(DFIG)和永磁直驱机组 (PMSG)的电磁暂态详细仿真模型。在此基础上, 忽略风速和风机的分布特性,建立了由两种风电机 组分别形成的风电场接入系统电磁暂态模型,如 图 3 所示。



图 3 风电场接入系统电路 Fig.3 Circuit of wind farm integration

图中,WG 线路的电压等级为 220 kV,左侧为 33 台 1.5 MW 的双馈(直驱)风电机组形成的 49.5 MW 的风电场,右侧为常规电源系统。 \dot{U}_{G}, \dot{U}_{W} 和 \dot{I}_{G}, \dot{I}_{W} 分别为G 端和W 端保护安装处测得的电 压、电流值。线路长度为 100 km,单位正序线路电 阻、电感、电容分别为 $r_{1} = 0.053$ $\Omega/\text{km}, l_{1} =$ 1.081 mH/km, $c_{1} = 0.013$ 2 μ F/km;单位零序线路 电阻、电感、电容分别为 $r_{0} = 0.291$ $\Omega/\text{km}, l_{0} =$ 2.74 mH/km, $c_{0} = 0.008$ 9 μ F/km;常规电源的系 统阻抗(归算至 220 kV 系统)为 $Z_{G1} = (2.43 +$ j54.35) $\Omega, Z_{G0} = (1.1 + j16.6)\Omega$ 。

4.2 选相元件适应性验证

为验证 2.1 节中负正序电流分支系数比故障特征分析的正确性,附录 A 图 A3 给出了双馈和直驱 风电场接入系统联络线中点发生 AG 故障时,风电 侧和系统侧的负正序电流分支系数比 k c21。

由附录 A 图 A3 可以看出,双馈和直驱风电侧 故障分量负正序电流分支系数比的幅值和相角有明 显波动。其中对于双馈风电侧,幅值比最大在 3.6 左右,相角差最大在-140°左右;对于直驱风电侧, 幅值比最小在 0.2 左右,相角差最大在 120°左右。 而常规系统侧负正序电流分支系数近似相等。

表1所示为风电接入系统联络线中点在各种类 型故障下风电侧传统选相元件的选相结果。

由表 1 可以看出,相电流差突变量选相元件和 序分量选相元件除在某些情况下可以选出故障相 外,其余情况均会误选相。为更清晰地看出传统选 相元件的各判断标准在故障期间的变化,图 4 和附 录 A 图 A4 给出了 AG 故障下的相电流差突变量选 相结果,图 5 和附录 A 图 A5 给出了 BCG 故障时序 分量选相元件的选相结果。

由图 4 和附录 A 图 A4 可以看出,系统发生 AG 故障时,由于故障分量负正序电流分支系数比 波动较大,风电侧相电流差突变量之间的幅值关系 不明确,造成选相结果不稳定,其中双馈风电侧可能 会误判为 CG 故障,直驱风电侧可能会误判为 ABG 故障。系统侧正确选出 AG 故障。

表 1 风电接入系统联络线故障时 传统选相元件的选相结果 Table 1 Simulation results of traditional phase selectors when fault occurs on tie-line of wind power integration system

故障	相电流差突变量选相元件		序分量选相元件	
类型	双馈风电侧	直驱风电侧	双馈风电侧	直驱风电侧
AG	CG/CAG	AG/ABG	AG/BCG	BCG
BG	AG/ABG	BG/BCG	BG/CAG	CAG
CG	BG/BCG	CG/CAG	CG/ABG	ABG
ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
BC	—	BC/ABC	CA/CAG	BC/BCG
CA	—	CA/ABC	CA/ABG	CA/ABG
AB	—	AB/ABC	AB/BCG	AB/BCG
BCG	—	BCG/ABC	BCG/AG	BCG/ABG
CAG	—	CAG/ABC	CAG/BG	CAG/BCG
ABG	—	ABG/ABC	ABG/CG	ABG/CAG

注: CG/CAG 表示有时判为 CG 有时判为 CAG 故障; -表示故 障过程中故障相的判别变化不少于 3 种而无法判断。



 图 4 双馈风电接入系统联络线中点发生 AG 故障 时相电流差突变量选相元件的仿真结果
 Fig.4 Simulation results of fault component phase current difference phase selector when AG fault occurs at F of DFIG wind farm integration



图 5 双馈风电接入系统联络线中点 发生 BCG 故障时序分量选相元件的仿真结果 Fig.5 Simulation results of sequence component phase selector when BCG fault occurs at F of DFIG wind power integration

由图 5 和附录 A 图 A5 可以看出,当系统发生 BCG 故障时,由于序分量选相元件中的正负序电流 幅值大小关系受故障分量负正序电流分支系数比波 动较大的影响,以及相位关系受分支系数波动和频 率偏移的影响,该选相元件判断结果不稳定,其中双 馈风电侧容易误选为 AG 或 ABG 故障,直驱风电 侧容易误选为 BCG 或 ABG 故障。系统侧正确选 出 BCG 故障。

4.3 方向元件适应性验证

风电侧传统方向元件在风电接入系统故障时的 判断结果见图 6 和附录 A 图 A6。其中图 6 为双馈 风电接入系统联络线发生 AG 故障时的方向判据结 果,附录 A 图 A6 为直驱风电接入系统联络线发生 BCG 故障时的方向判据结果。

由图 6 和附录 A 图 A6 可以看出,风电系统正 负序阻抗比的幅值相角波动较大造成了基于相量的 方向元件判断的失稳,如图 6(a),(b)和附录 A 图 A6(a),(b)所示;同时风电系统正序阻抗的波动 造成了正序故障分量方向元件判断的不稳定,而零 序和负序方向元件基本稳定在动作区内,如图 6(c) 和附录 A 图 A6(c)所示。





5 录波数据分析

本文利用山西某风电接入系统的现场故障录波数据,进一步验证传统选相及方向元件在风电接入 系统中的适应性。

现场故障录波的电气接线图与图 3 类似,左侧 50 MW 的双馈和直驱风电场经 π 形接线接入 220 kV 联络线。风电联络线上如图 3 中 F 点分别 发生 BC 相间故障和 BG 短路故障,采用传统选相 和方向元件对风电侧提供的故障电压电流 u_W 和 i_W 数据进行分析,结果见图 7 和附录 A 图 A7。





如图 7(a)和附录 A 图 A7(a)所示,风电侧负正 序电流分支系数比的幅值相角有较大波动,其中相 角差的波动范围超过 90°。因此,3 种相电流差幅值 关系不明确如图 7(b)和附录 A 图 A7(b)所示,将造 成相电流差突变量选相元件选相失败;序分量间相 位关系有较大波动如图 7(c)和附录 A 图 A7(c)所 示,将造成序分量选相元件选相失败;相和相差故障

研制与开发・

分量的方向元件判断结果有较大浮动如图 7(d), (e)和附录 A 图 A7(d),(e)所示,随时间将会从动 作区内偏离至动作区外;序故障分量方向元件波动 较大,无法判断故障方向,而负序和零序方向元件判 断结果可以稳定判断为正方向故障,如图 7(f)和附 录 A 图 A7(f)所示。

由上述录波分析结果可以看出,除零序和负序 方向元件可用外,基于故障附加网络分析的传统选 相和方向元件并不适用于风电接入系统的风电侧。

基于传统选相及方向元件在风电接入系统中的 适应性分析可知,适用的选相和方向原理应基于时 域和基于全量,如基于时域相关性分析的选相方 法^[20],采用双端量的高压输电线路选相方法^[21],基 于波形系数的自适应方向元件^[22]和基于模型误差 的自适应方向元件^[23]等。

6 结论

本文基于风电系统故障特征,分析了传统选相 及方向元件在风电接入系统中的适应性,建模仿真 及现场故障录波验证了适应性分析的正确性。结论 如下。

1)传统选相和方向元件均基于故障分量网络分析,其动作性能取决于故障分量正负序电流在保护 安装处分支系数近似相等。

2)风电系统背侧正负序系统阻抗相差很大,使 得传输线路风电侧的故障分量正负序电流分支系数 差异较大,而在系统侧近似相等。因此,传统选相及 方向元件应用于风电接入系统的风电侧时存在适应 性问题。

3)故障期间风电系统的弱馈性使得风电侧正序 电流很小,会影响选相原理中的幅值关系判断;风电 注入电网的高谐波以及双馈风电接入系统故障带来 的电流频率偏移,会影响选相和方向原理中相位关 系判断,从而存在适应性问题。

4)基于传统选相及方向元件在风电接入系统中 的适应性分析可知,适用的选相和方向原理应基于 时域和基于全量。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 叶希,鲁宗相,乔颖,等.大规模风电机组连锁脱网事故机理初探 [J].电力系统自动化,2012,36(8):11-17.

YE Xi, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 11-17.

- [2]何世恩,姚旭,徐善飞.大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):21-27.
 HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J].
 Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21-27.
- [3] 沈枢,张沛超,方陈,等.双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J].电力系统自动化,2014,38(15):87-92.DOI: 10.7500/AEPS20130911008.
 SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 87-92. DOI: 10.7500/AEPS20130911008.
- [4]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.

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.

[5] 张保会,张金华,原博,等.风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J].电力自动化设备,2013,33(6):1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection: (6) analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J].
Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.

- [6] NADER S, ROBERT Z, SMITH J C, et al. Modeling of wind power plants for short circuit analysis in the transmission network[C]// Proceedings of the IEEE PES 2008 Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, USA: 7p.
- [7] WALLING R A, REICHARD M L. Short circuit behavior of wind turbine generators [C]// 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, March, 2009, College Station, TX, USA: 495-502.
- [8]何世恩,素南加乐,杨铖,等.适应于酒泉风电送出的 750 kV 线路纵联保护原理研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(16): 87-91.

HE Shien, SUONAN Jiale, YANG Cheng, et al. A 750 kV transmission line pilot protection suitable to Jiuquan wind power base delivery[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 87-91.

- [9] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术[M].西安:西安交 通大学出版社,1996.
- [10] 薛士敏,贺家李,李永丽.特高压输电线路自适应三相对称故障选相元件[J].电力系统自动化,2010,34(20):80-83.
 XUE Shimin, HE Jiali, LI Yongli. Adaptive three-phase fault selection element in UHV transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 80-83.
- [11] 徐振宇,杨奇逊,刘万顺.一种序分量高压线路保护选相元件
 [J].中国电机工程学报,1997,17(3):214-216.
 XU Zhenyu, YANG Qixun, LIU Wanshun. A sequence fault phase selector for transmission line protective relay [J].
 Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214-216.

[12] 丛伟,田崇稳,赵义术,等.基于电压变化量幅值比较的智能配 电网故障方向元件[J].电力系统自动化,2014,38(15):93-99. DOI:10.7500/AEPS20130422001.

CONG Wei, TIAN Chongwen, ZHAO Yishu, et al. A fault directional element based on voltage variation amplitude comparison for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 93-99. DOI: 10.7500/ AEPS20130422001.

[13] 司新跃,陈青,高湛军,等.基于电流相角突变量方向的有源配 电网保护[J].电力系统自动化,2014,38(11):97-103.DOI: 10.7500/AEPS20130509007.

SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 97-103. DOI: 10.7500/ AEPS20130509007.

[14] 徐振宇,杜兆强,孟岩,等.零、负序方向元件的特殊问题研究
 [J].电力自动化设备,2008,28(5):21-25.
 XU Zhenyu, DU Zhaoqiang, MENG Yan, et al. Special problems in zero/negative sequence directional element [J].

Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 21-25. 曹書 刀体团 力先由 系统 用刀 pwA 亦倫 器的 研究[D] 人為

- [15] 曹青.双馈风力发电系统用双 PWM 变换器的研究[D].长沙: 湖南大学,2008.
- [16] 蔚芳,刘其辉,谢孟丽,等.适应多类型故障的双馈风电机组低 电压穿越综合控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(5): 23-28.

YU Fang, LIU Qihui, XIE Mengli, et al. Comprehensive control strategy of wind turbine driven doubly fed induction generation low voltage ride through adapt to multi-type faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 23-28.

[17] 苗琰.直驱型风力发电机组用变流器控制策略的研究[D].济 南:山东大学,2011.

[18]风电场接入电力系统技术规定:GB/T 19963-2011[S].北京:

中国标准出版社,2011.

- [19] 国家电网公司.风电场接入电网技术规定[S].北京:国家电网公司.2009.
- [20] 索南加乐,邓旭阳,高峰,等.基于时域相关性分析的高压线路 保护选相新原理[J].电力系统自动化,2007,31(22):41-45.
 SUONAN Jiale, DENG Xuyang, GAO Feng, et al. A novel principle of phase selection for transmission line protective relaying based on time-domain correlation analysis [J].
 Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 41-45.
- [21] 杨铖,索南加乐,贾伟,等.采用双端量的高压输电线路选相元件[J].高电压技术,2011,37(5):1261-1267.
 YANG Cheng, SUONAN Jiale, JIA Wei, et al. Transmission line phase selector of measurements at two terminals[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1261-1267.
- [22] 刘文涛,索南加乐,付伟,等.基于波形系数的自适应方向元件
 [J].电力系统自动化.2005,29(18):51-55.
 LIU Wentao, SUONAN Jiale, FU Wei, et al. Adaptive directional element based on waveform factor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 51-55.
- [23] 康小宁,杜岩平,索南加乐,等.基于模型误差的自适应方向元件[J].电力自动化设备.2009,29(5):43-47.
 KANG Xiaoning, DU Yanping, SUONAN Jiale, et al. Adaptive directional element based on model error[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 43-47.

王晨清(1987—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:电力系统继电保护。E-mail: wcqmorning@stu.xjtu. edu.cn

宋国兵(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究 方向:电力系统继电保护。

汤海雁(1980—),男,博士,主要研究方向:新能源发电 建模与并网仿真分析。

(编辑 章黎)

Adaptability Analysis of Phase Selectors and Directional Relays in Power Systems Integrated with Wind Farms

WANG Chenqing¹, SONG Guobing¹, TANG Haiyan², CHANG Zhongxue¹, LI Duanzhen¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The adaptability of traditional phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms is studied. Additional fault network is the basis for both traditional phase selectors and directional relays. The positive and negative sequence impedances of the wind power system vary widely and their amplitudes are both much larger than that of a regular power system during a fault. The impedance characteristics will then lead to a big difference between positive and negative current branched coefficients at the wind power side. Thus traditional phase selectors and directional relays based on equal positive and negative current branched coefficients are not necessarily suitable for wind power integration. Data from PSCAD simulation and field fault record have verified the theoretical analysis of adaptability. Eventually, research recommendations for phase selectors and directional relays suitable for power systems integrated with wind farms are given according to the adaptability analysis.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215105).

Key words: wind power system; fault characteristics; phase selector; directional relay; protection adaptation