

利用电力电子扰动技术的系统对地电容检测方法

朱珂¹, 殷鹏¹, 刘颖英², 刘文华³

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省济南市 250061;

2. 全球能源互联网研究院, 北京市 102211; 3. 东营供电公司, 山东省东营市 257091)

摘要:准确计算系统对地电容对自调谐消弧线圈的精确补偿至关重要。文中利用投切消弧线圈阻尼电阻的电力电子开关,通过短时控制其导通状态以产生含有丰富频率成分的扰动电压、电流。利用该扰动电压、电流信号并结合基于电力电子扰动技术的谐波阻抗测量方法测量系统对地电容以用于预调式消弧线圈的自调谐。该方法现场可实施性强,对消弧线圈工作状态的影响可忽略不计,仿真分析和模拟实验都验证了其有效性。

关键词:对地电容;晶闸管;阻尼电阻;谐波阻抗

0 引言

中国中压配电网广泛采用中性点非有效接地运行方式。近年来随着配电网规模的逐渐扩大,电网馈线数量增多,线路对地电容电流日益增大,单相接地故障电弧难以自熄,且产生较高的过电压^[1-2],可能危害健全相造成两相短路。因此,具有自动调谐功能的消弧线圈装置被广泛用来补偿故障电流以保证配电网运行可靠性^[3]。

消弧线圈自动跟踪补偿的关键是准确测量系统对地电容以确定消弧线圈的投入容量。中性点位移电压法^[2,4]根据串联谐振原理,通过调节消弧线圈档位使中性点位移电压达到最大值以确定谐振点。该方法需要频繁调节消弧线圈,对于级差调节的消弧线圈测量误差较大。两点法与三点法^[2,4,5]通过测量消弧线圈档位调节前后中性点位移电压来计算系统对地电容值。前者忽略了电网阻尼率及消弧线圈的有功损耗电导,因此会导致较大的计算误差;后者虽考虑了电网阻尼率,但同样忽略了消弧线圈的有功损耗电导,影响计算精度。阻抗三角形法^[2,6]利用串联谐振中电阻电抗之间的三角形关系计算系统对地电容。该方法的准确性受到电网不平衡度的影响。注入变频信号法^[7-10]利用电压互感器向消弧线圈注入变频信号,通过系统反映到电压互感器二次侧的信息来确定系统谐振频率,从而计算系统的

电容电流。该方法具备较高的测量精度,但实时性较差。注入恒频信号法^[11-12]从电压互感器开口三角侧注入一个或多个频率的电流信号,通过测量PT二次侧电压计算出配电网对地电容值和电容电流值。该方法在恰当的选频下具有较高的测量精度。

随着容量、耐压和可靠性的逐渐提高,电力电子开关器件因其动作的迅速性而开始被用于“预调式”消弧线圈阻尼电阻的投切。本文通过瞬时改变投切阻尼电阻电力电子开关的工作状态,以产生可控的电压、电流扰动信号用于系统对地电容的检测。该方法不需要额外信号注入装置,不存在注入信号法的频率匹配问题,丰富频率下的各计算结果为最终确定对地电容提供了数据优化空间,有利于检测准确性的提高。理论分析、仿真及模拟实验均验证了该方法的可行性。

1 方法的提出与分析

1.1 基本原理与实现方案

“预调式”消弧线圈在电网正常工作时串联或并联阻尼电阻以限制中性点位移过电压^[1-2],而电力电子开关因其动作迅速而逐渐用于故障状态下快速退出阻尼电阻。本文针对上述具有电力电子开关的“预调式”消弧线圈,提出一种新型对地电容检测方法,即通过控制电力电子开关的工作状态等效地将阻尼电阻短时退出,以产生含有丰富频率成分的扰动电压、电流,利用该扰动电压、电流信号并结合基于电力电子扰动技术的谐波阻抗测量方法^[13]计算系统对地电容以用于消弧线圈的自调谐,具体实施方案见图1,其中电力电子开关用晶闸管替代。

收稿日期: 2015-12-24; 修回日期: 2016-04-17。

上网日期: 2016-09-28。

山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEM026);山东省重点科技计划资助项目(2015GGX104010)。

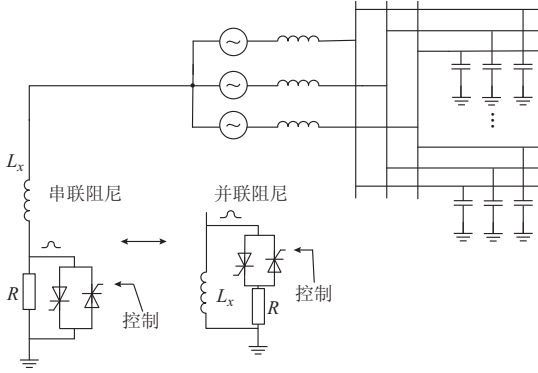


图1 具体实施方案
Fig.1 Specific implementation plan

1.2 扰动电压、电流信号的提取

通过控制晶闸管的工作状态等效的将阻尼电阻短时退出时,晶闸管端口会产生可控的扰动电压、电流信号。其中串联阻尼下的扰动电压与并联阻尼下的扰动电流信号均是背景叠加信号,可采用相邻周波相减的方式提取,具体方法见附录 A 图 A1。

1.3 谐波阻抗测量

如图 2 所示,当晶闸管导通状态受控瞬时改变时,根据故障分析理论,相当于在有源系统短时叠加上一个扰动电压和电流,利用该扰动电压、电流信号可获得有源线性系统在多个频率下的等效阻抗^[13-16]。

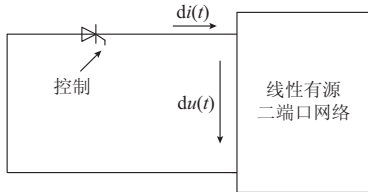


图2 谐波阻抗测量原理
Fig.2 Measuring principle diagram of the harmonic impedance

设 $dU(j\omega)$ 和 $dI(j\omega)$ 分别为晶闸管受控下产生的扰动电压、电流脉冲信号经傅里叶变换后频率为 ω 的分量,其中 ω 为基频,则线性二端口网络在各个频率下的等效阻抗为:

$$Z(j\omega) = \frac{dU(j\omega)}{dI(j\omega)} \quad (1)$$

1.4 系统对地电容计算

根据故障分析理论,系统的故障状态可以等效为系统的稳定状态以及额外的故障状态^[17],其中,系统的稳定状态是指晶闸管原有工作状态,而控制晶闸管产生的扰动电压、电流由系统额外的故障状态产生。

为了计算的准确性,本文取扰动电压、电流中含

量较高的 8 倍频以下各谐波分量计算系统谐波阻抗。在这一频率范围内开展相关谐波分析和计算,变压器和配电线路仍采用传统的 T 型和集中参数 π 型模型等效^[18-22]。

1) 消弧线圈串联阻尼

消弧线圈串联阻尼下方方案实施简化电路如图 3 所示,晶闸管原处于关断状态。在 $t=0$ 时刻控制其中一个晶闸管导通,导通 T_1 时间后关断,晶闸管端电压又经 T_2 时间衰减至零。图中晶闸管 VT 在 $0 \leq t \leq T_1$ 时间内导通,在 $T_1 \leq t \leq T_2$ 时间内断开。

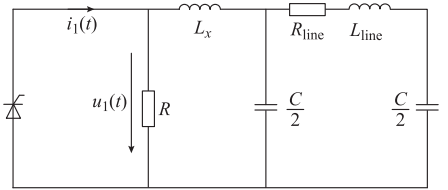


图3 串联阻尼下故障状态等效电路
Fig.3 Equivalent circuit of series damping fault condition

图 3 中, L_x 为消弧线圈电感, R 为与消弧线圈串联的阻尼电阻, R_{line} 为线路等效电阻, L_{line} 为线路等效电感, C 为系统对地电容, $i_1(t)$ 为因晶闸管工作状态改变而产生的流过晶闸管的扰动电流, $u_1(t)$ 为因晶闸管工作状态改变而在晶闸管两端产生的扰动电压。其中:

$$i_1(t) = \begin{cases} i_{11}(t) & 0 \leq t < T_1 \\ 0 & T_1 \leq t \leq T_1 + T_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$u_1(t) = \begin{cases} u_{11}(t) & 0 \leq t < T_1 \\ u_{12}(t) & T_1 \leq t \leq T_1 + T_2 \end{cases} \quad (3)$$

根据电路理论并结合式(1)可得:

$$\frac{\dot{U}_1(j\omega)}{\dot{I}_1(j\omega)} = \frac{R(j\omega L_x + M)}{R + j\omega L_x + M} \quad (4)$$

式中:

$$M = \frac{R_{line} + j\omega L_{line} + \frac{2}{j\omega C}}{(R_{line} + j\omega L_{line}) \frac{j\omega C}{2} + 2}$$

由式(4)可求出不同频次下系统理论对地电容。

2) 消弧线圈并联阻尼

消弧线圈并联阻尼下方方案实施简化电路如图 4 所示,两个晶闸管原处于交替导通状态,在 $t=0$ 时刻停止向即将换流导通的晶闸管提供触发信号,该晶闸管继续处于关断状态 T_1' 时间后触发导通,流过其电流经 T_2' 时间衰减至零,图中晶闸管 VT 在 $0 \leq t \leq T_1'$ 时间内断开,在 $T_1' \leq t \leq T_2'$ 时间内导通。

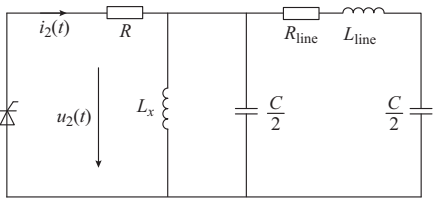


图 4 并联阻尼下故障状态等效电路
Fig.4 Equivalent circuit of parallel damping fault condition

$u_2(t)$ 为晶闸管两端扰动电压, $i_2(t)$ 为扰动电流。其中:

$$i_2(t) = \begin{cases} i_{21}(t) & 0 \leq t < T_1' \\ i_{22}(t) & T_1' \leq t \leq T_1' + T_2' \end{cases} \quad (5)$$

$$u_2(t) = \begin{cases} u_{21}(t) & 0 \leq t \leq T_1' \\ 0 & T_1' \leq t < T_1' + T_2' \end{cases} \quad (6)$$

同理可得:

$$\frac{\dot{U}_2(j\omega)}{\dot{I}_2(j\omega)} = R + \frac{j\omega L_x M}{j\omega L_x + M} \quad (7)$$

由式(7)可求出不同频次下系统理论对地电容。

1.5 扰动持续时间的确定

扰动电压、电流信号的完整性对谐波阻抗测量的准确性至关重要,扰动电压、电流波形只有取完整,才可通过激励和响应在频域内的线性关系获得系统在各次频率下的等效阻抗^[13-16]。用于计算谐波阻抗的扰动电压、电流波形在时间上由两部分构成:晶闸管工作状态改变时间段 $T_1(T_1')$ 和晶闸管工作状态恢复后扰动电压或电流波形的衰减时间 $T_2(T_2')$ 。其中 $T_1(T_1')$ 可通过测量获得,而衰减波形对应的时间 $T_2(T_2')$ 难以通过测量获得,却可以通过近似计算获得。

1)消弧线圈串联阻尼

图 3 所示等效电路在 $T_1 < t < T_2$ 时间内对应电路的微分方程为:

$$\begin{cases} i_{C'12}(t) + i_{R_{line}12}(t) = i_{R12}(t) = i_{L12}(t) \\ i_{R12}(t)R + L_x \frac{di_{L12}(t)}{dt} + \frac{2}{C} \int i_{C'12}(t) dt = 0 \\ i_{R_{line}12}(t)R + L_{line} \frac{di_{R_{line}12}(t)}{dt} + \frac{2}{C} \int i_{R_{line}12}(t) dt + \frac{2}{C} \int i_{C'12}(t) dt = 0 \\ u_{12}(t) = i_{R12}(t)R \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)可求出 $u_{12}(t)$ 的衰减时间常数 τ_1 为:

$$\tau_1 \approx \frac{1}{\xi_1 \omega_{n1}} \quad (9)$$

式中: $\xi_1 = R \sqrt{C/(4L_x)}$; $\omega_{n1} = \sqrt{1/(L_x C)}$; $T_2 = 4\tau_1$, T_2 可由 L_x 与 R 直接确定。

2)消弧线圈并联阻尼

图 4 所示电路在 $T_1' < t < T_2'$ 时间内对应电路的微分方程为:

$$\begin{cases} u_{22}(t) = i_{22}(t)R + L_x \frac{di_{L22}(t)}{dt} \\ L_x \frac{di_{L22}(t)}{dt} + \frac{2}{C} \int i_{C'22}(t) dt = 0 \\ \frac{2}{C} \int i_{C'22}(t) dt + i_{R_{line}22}(t)R + L_{line} \frac{di_{R_{line}22}(t)}{dt} + \frac{2}{C} \int i_{R_{line}22}(t) dt = 0 \\ i_{22}(t) = i_{L22}(t) + i_{C'22}(t) + i_{R_{line}22}(t) \end{cases} \quad (10)$$

同理可得 $i_{22}(t)$ 衰减时间常数 τ_2 为:

$$\tau_2 \approx \frac{1}{\xi_2 \omega_{n2} - \omega_{n2} \sqrt{\xi_2^2 - 1}} \quad (11)$$

式中: $\xi_2 = \sqrt{L_x/C}/(2R)$; $\omega_{n2} = \sqrt{1/(L_x C)}$; $T_2' \approx 4\tau_2$ 。

根据式(11)在 L_x 与 R 已知情况下, T_2' 与未知的对地电容 C 呈正比例关系,鉴于消弧线圈处于过补偿状态即 $C < 1/(\omega^2 L_x)$,为保证 FFT 频谱窗口能够完全包含衰减成分,在计算衰减时间 T_2' 过程中可近似取 $C = 1/(\omega^2 L_x)$ 。

1.6 检测结果优化

晶闸管两端产生的扰动电压、电流信号含有丰富的频率成分,每个频率成分均可计算相应的对地电容,鉴于某些频率成分下的电压、电流含量可能较低,进而影响该频率下对地电容测量的准确性,因此需要对各频次计算结果进行优化以最终得到精确的对地电容值。

由式(4)、式(7)计算出各个频次下对地电容: $C_1, C_2, \dots, C_n$,利用最小二乘法对 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 进行线性拟合。可设拟合直线为 $C = X + YI, i = 1, 2, \dots, n$ 为谐波次数,则 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 的正规方程为:

$$\begin{bmatrix} \sum 1 & \sum i \\ \sum i & \sum i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum C_i \\ \sum i C_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)可以得出 i 次谐波下的线性拟合值 C_i^* 为:

$$C_i^* = \frac{(\sum i^2 - i \sum i) \sum C_i - (i \sum 1 + \sum i) \sum i C_i}{\sum i \sum i^2 - (\sum i)^2} \quad (13)$$

其中 $|C_j^* - C_j| > 3 \min |C_i^* - C_i|$ 的点应剔除。设第 j 个点为误差较大点,将其剔除后的对地电容优化值为:

$$\bar{C} = \frac{C_1 + \dots + C_{j-1} + C_{j+1} + \dots + C_n}{n-1} \quad (14)$$

基于以上分析,本方案的流程图如附录 A 图 A2 所示。

通过上述介绍可知,由于本方法利用人为产生的含有丰富频率成分的扰动信号在各频率下直接计算系统对地电容,因此同依赖单一或有限次频率的各对地电容检测法相比在对地电容检测结果上拥有更充足的数据优化空间。此外本方法不存在注入法的频率匹配问题,不会因消弧线圈容量选取不当造成检测误差,后续仿真和模拟实验将对其可行性开展研究。

2 关键参数确定

由于系统零序回路近似线性,施加在该回路上的激励和响应间存在线性关系,即扰动电流响应中的各频率成分会在线性对应关系下随着扰动电压激励中各频率成分的变化而变化。因此从理论上讲本文所述对地电容测量方法的准确性不受晶闸管触发角及系统中性点位移电压大小的影响(位移电压为 0 除外)。然而在本方案实际应用过程中,这两个关键参数却需要加以确定。

2.1 晶闸管触发角的确定

以串联阻尼为例,如果晶闸管的触发角过大,则可能造成产生的扰动电压或电流信号太微弱而难以检测到。如果晶闸管的触发角过小,不仅需要更大容量的元器件,而且产生的较大扰动还会恶化系统电能质量,甚至有可能给消弧线圈的正常运行带来不利影响。

为此,本文基于晶闸管的可控性,提出了对地电容测量方法具体实施过程中晶闸管触发角的确定原则,即先让晶闸管以较大触发角触发导通,如果产生的扰动因太微弱而难以检测到,则通过调节晶闸管触发角使产生的扰动逐渐增大,直到能够被检测到为止。以 3.4 节模拟实验为例,当晶闸管触发角为 175° 时就足以准确检测到扰动。

2.2 中性点最小位移电压的确定

利用本方案测量对地电容时,中性点需提供一位移电压,该位移电压的最小值取决于晶闸管的维持电流,即该位移电压应足够大到使流过晶闸管的电流大于其自身的维持电流。为此,本文给出了方案正常工作所需中性点最小位移电压的确定方法。

晶闸管的额定电压可由系统允许的中性点最大位移电压求到,正常运行情况下谐振接地系统中性点位移电压最大允许值为系统额定相电压的 15%,由此确定晶闸管的额定电压为(以消弧线圈串联阻尼为例):

$$V_{TMAX} = k \frac{0.15R}{\sqrt{\omega^2 L_x^2 + R^2}} U_A \quad (15)$$

式中: k 为裕量系数,通常取 2。

由 V_{TMAX} 可以确定晶闸管的型号及其截止电流 I_{T1} 。根据 I_{T1} 可得晶闸管正常工作所需最小中性点位移电压 V_{MIN} :

$$V_{MIN} = I_{T1} \sqrt{\omega^2 L_x^2 + R^2} \quad (16)$$

只要中性点位移电压大于 V_{MIN} ,即可保证晶闸管正常工作以产生扰动电压、电流信号用于对地电容测量。以下文 10 kV 仿真系统为例计算出的所需最小中性点位移电压 V_{MIN} 为 24 V。

3 仿真分析及模拟实验

本文利用仿真对方案的可行性加以印证,具体参数如下。

1) 配电网:10 kV, 50 Hz, 系统中性点经消弧线圈接地,消弧线圈串联阻尼电阻值为 $R = 150 \Omega$,消弧线圈并联阻尼电阻值 $R = 253 \Omega$ 。

2) 配电线路:出线条数为 10 条,每条长 20 km,线路参数 $R_1 = 0.6 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 1.27 \text{ mH}/\text{km}$, $R_0 = 0.71 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 9 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$, $L_0 = 6.29 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 8.41 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$ 。

3) 负载:每条出线带 2 MW 负荷,功率因数 0.9。

4) 采样率:系统每周期采样 512 个点。

3.1 算法验证

图 5 为晶闸管触发角 $\delta = 90^\circ$ 、消弧线圈电感值 $L_x = 1.68 \text{ H}$ 下的扰动电压、电流脉冲仿真波形,该波形是通过将含有扰动的波形同不含有扰动的背景波形相减获得,图中同时标出了扰动电压、电流的两个阶段 $T_1(T_1')$ 和 $T_2(T_2')$,其中 T_2 和 T_2' 分别由式(11)和式(13)计算得到。从图中可以看出, $T_1 + T_2$ 和 $T_1' + T_2'$ 可将串联阻尼和并联阻尼下产生的全部扰动波形都包含进去。

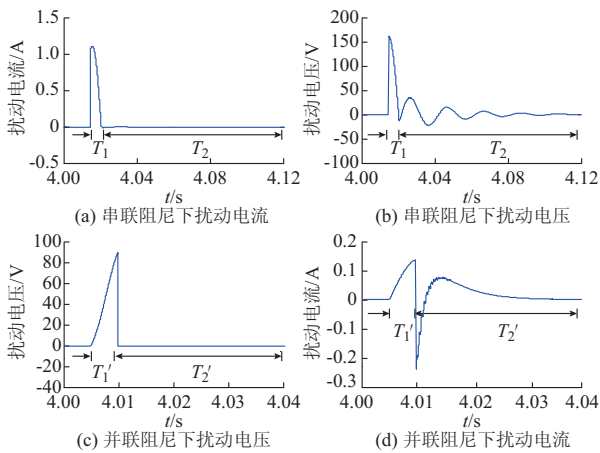


图 5 晶闸管两端电压、电流扰动波形
Fig.5 Voltage and current disturbance pulse of the thyristors

图 6 为晶闸管触发角为 90° 、消弧线圈电感值 $L_x=1.68\text{ H}$ 情况下,消弧线圈分别串联、并联阻尼电阻情况下不同频次分量计算结果拟合后的效果图,其中系统对地电容抗值为 $621.5\ \Omega$ 。由图 6 可以看出某些频率分量(含量较低)计算得到的对地电容(圆圈标出部分)与实际结果偏差较大且远离拟合曲线,可将该点剔除以改善计算结果的精确度。

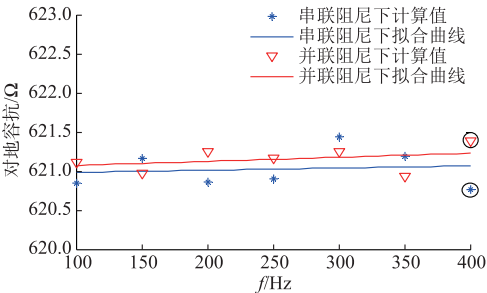


图 6 不同频次下对地电容拟合效果
Fig.6 Fitting effect of grounding capacitance under different frequency

3.2 灵敏度分析

由于电力电子开关晶闸管的可控性,通过控制其触发角可产生不同强度的扰动电压、电流以用于对地电容测量。附录 A 图 A3 为消弧线圈电感值 $L_x=1.68\text{ H}$, $f=100\text{ Hz}$ 时在不同晶闸管触发角 δ 下由前文所述计算及优化方法最终计算出的系统对地电容抗值。由附录 A 图 A3 可以看出在不同 δ 下计算出来的系统对地电容值与实际值十分接近,误差均在 0.3% 以内。

利用本方案求取对地电容时,需要中性点处提供一定的位移电压已产生扰动电压、电流,该位移电压的大小由系统不对称度和脱谐度决定。附录 A 图 A4 为不同不平衡度与脱谐度下对地电容的计算

结果。由该图可以看出在仿真环境下不平衡度及脱谐度对对地电容计算结果的影响可忽略。

3.3 方案对中性点位移电压的影响

正常运行情况下谐振接地系统中性点位移电压最大允许值为额定相电压的 15% 。由于运行方式的改变或逐相操作等原因,可能使位移度明显升高。当中性点位移电压不大于 30% 相电压时,允许运行 $1\text{ h}^{[2]}$ 。本方案的实施过程会导致中性点位移电压的瞬时升高,附录 A 图 A5 为正常运行时中性点位移电压为 15% 相电压情况下本方案实施过程中引起的中性点位移电压暂升情况。由附录 A 图 A5 可以看出,在两种不同阻尼电阻接线方式下,本方案实施过程引起的中性点位移电压的暂时升高均在 30% 相电压以内,满足规定要求。

3.4 模拟实验

本文所述方案通过模拟实验进行了验证,基于 STC89C52 芯片制作晶闸管的控制硬件,用 C 语言编写其软件;利用 NI DAQpad-6015 作为扰动电压电流信号采集硬件,LabView 7.1 编写采集信号软件。受于实验室条件所限,电压等级降为 220 V ,实验电路采用两条馈线,线路阻抗按照采用 π 型等效电路设置,线路参数以及负载参数均与 10 kV 配电网络一致。模拟实验参数为:额定电压 220 V ,出现条数为 2,线路长度 20 km ,线路等效电阻 $R_1=12\ \Omega$, $R_0=15\ \Omega$,线路等效电感 $L_1=25\text{ mH}$, $L_0=40\text{ mH}$,线路等效电容 $C_1=1.5\ \mu\text{F}$, $C_0=1.753\ \mu\text{F}$,负荷 1.5 kW ,单相负荷电阻 $87\ \Omega$,单相负荷电感 0.1336 H ,功率因数 0.9 ,消弧线圈电感 0.49 H ,串联阻尼电阻 $28\ \Omega$,并联阻尼电阻 $180\ \Omega$,电网不平衡度为 3% 。附录 A 图 A6 为谐振接地系统模拟实验接线图。

图 7 为晶闸管触发角为 90° 情况时,相同条件下模拟实验与仿真实验扰动脉冲波形对比图,从图 7 可以看出,模拟实验得到的晶闸管两端扰动脉冲波形与仿真结果一致。

图 8 为在不同频次,消弧线圈分别串联、并联阻尼电阻情况下的对地电容计算结果。从图中可以看出,低频分量下求得的对地电容值误差较小,而高频成分由于含量低使得计算结果误差较大。因此,在利用不同频次分量计算过程中应对计算结果进行相应的优化处理以得到更准确的计算值。

晶闸管触发角 90° 时根据式(14)最终优化计算出的对地电容值为:实际值 $21.04\ \mu\text{F}$,串联阻尼下优化值 $21.132\ \mu\text{F}$,并联阻尼下优化值 $21.01\ \mu\text{F}$ 。

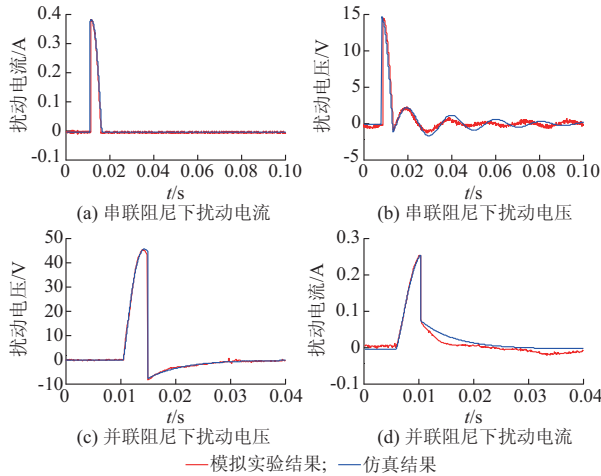


图 7 模拟实验与仿真波形对比图

Fig.7 Comparison between simulated waveform and experimental waveform

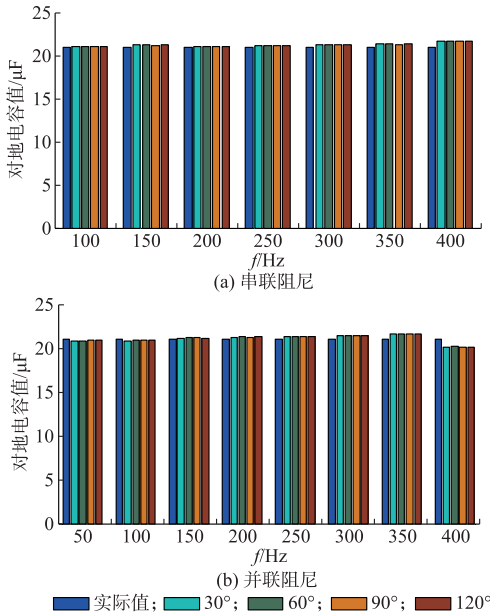


图 8 不同频次下对地电容计算结果

Fig.8 Calculation results of grounding capacitance under different frequencies

4 结语

基于电力电子开关的可控性,本文提出了一种计算系统对地电容的新方法:系统正常运行时,通过瞬时改变投切阻尼电阻电力电子开关的工作状态,等效的将阻尼电阻短时退出以产生电压、电流扰动,通过对晶闸管两端该电压、电流扰动的检测与分析,结合谐波阻抗测量技术可获得系统在多个频率下的频率响应进而准确求出系统对地电容。理论、仿真及模拟实验均验证了该方法的可行性。

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

参考文献

- [1] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [2] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [3] 连鸿波,谭伟璞,裴善鹏,等.谐振接地电网预随调补偿方式及其实现[J].电力系统自动化,2005,29(21):79-84.
LIAN Hongbo, TAN Weipu, PEI Shanpeng, et al. Principle and realization of presetting and following-setting compensation mode in resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 79-84.
- [4] 汤放奇,李景禄,曾祥君,等.补偿电网中性点位移电压异常的原因及对策[J].高电压技术,2005,31(4):12-13.
TANG Fangqi, LI Jinglu, ZENG Xiangjun, et al. Analysis of abnormal displacement voltage of neutral points in compensated electric network and its control measure[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 12-13.
- [5] 窦保卫,谭伟璞,张健,等.谐振接地系统电容电流检测的改进调谐法[J].现代电力,2010,27(6):26-30.
DOU Baowei, TAN Weipu, ZHANG Jian, et al. The improved tuning method for the detection of capacitance current in resonant grounding system[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(6): 26-30.
- [6] 韦良.电网电容电流间接测量方法的研究[D].河北:华北电力大学,2009.
- [7] 张宇,陈乔夫,程路,等.检测配电网电容电流及辨识高阻接地的新方法[J].电力系统自动化,2008,32(8):83-87.
ZHANG Yu, CHEN Qiaofu, CHENG Lu, et al. New method of producing clock of high accuracy for substations based on error analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 83-87.
- [8] 曾祥君,于永源.基于注入信号法的消弧线圈自动调谐新技术[J].电力系统自动化,2000,24(9):38-41.
ZENG Xiangjun, YU Yongyuan. Novel technique for petersen-coil tuning based on injecting current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 38-41.
- [9] 曾祥君,易文韬,刘张磊,等.注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J].电力系统自动化,2008,32(4):77-80.
ZENG Xiangjun, YI Wentao, LIU Zhanglei, et al. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [10] 刘提,李原.测量消弧线圈接地系统对地电容电流的新方法[J].现代电力,2009(5):45-48.
LIU Ti, LI Yuan. New measurement method for capacitive grounding current in grounded system through petersen-coil[J]. Modern Electric Power, 2009(5): 45-48.
- [11] 曾祥君,许瑶,陈博,等.中性点不接地配电网电容电流实时测量新方法[J].电力系统自动化,2009,33(2):78-81.
ZENG Xiangjun, XU Yao, CHEN Bo, et al. A novel

measuring method of capacitive current for insulated neutral distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 78-81.

[12] 刘力,孙结中.一种测量配电网电容电流的新方法[J].电网技术,2001,25(5):63-65.

LIU Li, SUN Jiezhong. A new method to measure capacitance current in distribution network[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 63-65.

[13] 朱珂,卢晓惠,于青,等.基于可控短路技术的系统阻抗测量方法在孤岛检测中的应用[J].电力系统自动化,2013,37(2): 119-124.

ZHU Ke, LU Xiaohui, YU Qing, et al. A novel method of impedance measurement used in islanding detection based on controllable short-circuit technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 119-124.

[14] WANG W, ZHU K, ZHANG P, et al. Identification of the faulted distribution line using thyristor-controlled grounding [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(1): 52-60.

[15] 朱珂,张鹏,徐文远.一种基于可控短路的故障选线方案[J].电力自动化设备,2008,28(11):1-7.

ZHU Ke, ZHANG Peng, XU Wenyuan. Faulty line identification using controllable-short-circuits [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 1-7.

[16] WANG W, NINO E E, XU W. Harmonic impedance measurement using a thyristor-controlled short circuit[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(5):

707-713.

[17] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.

[18] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社, 2012.

[19] DUGAN R C, MCGRANAGHAN M F, BEATY H W. Electrical power systems quality [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1996.

[20] 程浩忠.电能质量概论[M].北京:中国电力出版社,2008.

[21] 周文珊.主动配电网建模及谐波特性研究[D].北京:北京交通大学,2012.

[22] 方少麟,李建华,黄莹,等.变压器谐波模型的研究与评价[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(2):103-108.

FANG Shaolin, LI Jianhua, HUANG Ying, et al. Research and evaluation of the transformer harmonic model [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 103-108.

朱珂(1977—)男,博士,副教授,主要研究方向:电能质量、电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: sdzhuhe@hotmail.com

殷鹏(1991—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: 15162124713@163.com

刘颖英(1981—),女,工程师,主要研究方向:电能质量、电力电子技术。

(编辑 丁琰)

Detection Method for System Grounding Capacitance Using Power Electronic Disturbance Technology

ZHU Ke¹, YIN Peng¹, LIU Yingying², LIU Wenhua³

- (1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China;
- 2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102211, China;
- 3. Dongying Power Supply Corporation, Dongying 257091, China)

Abstract: Accurate calculation of system ground capacitive current is very important for precise compensation for self-tuning petersen-coil. In this paper, the power electronic switch is used to generate disturbed voltage and current containing plenty of frequency components by momentarily controlling its conduction state. The disturbance voltage and current signals are used to measure the ground capacitance in conjunction with the measuring method of harmonic impedance based on power electronic perturbation technique. The method is highly effective, and the impact on the working state of the arc suppression coil can be neglected. Simulation analysis and simulated experiment have proved the effectiveness of the method.

This work is supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (No. ZR2013EEM026) and Shandong Provincial Key Science and Technology Program of China (No. 2015GGX104010).

Key words: grounding capacitance; thyristor; damping resistance; harmonic impedance