

Case Studies in On-Line Measurement of PD in
Motors Fed by Voltage Source PWM Drives
PWM 駆動モータのオンライン部分放電(PD)測定の事例

G.C. Stone, I. Culbert, H.G. Sedding

Qualitrol-Iris Power (アイリス・パワー社)

Mississauga, Ontario, Canada

訳：丸文株式会社

要旨 オンライン部分放電 (PD) 測定は、50 / 60Hz 電源で駆動される定格 6kV 以上のモータで広く採用されています。しかしここ数年の間に、プロセス効率を改善するために可変速モータとして使用しようとインバータでモータを駆動するようになりました。現在使用されている駆動電源方式の 1 つにパルス幅変調 (VS-PWM) タイプがあります。このような駆動装置は、マイクロ秒以下の立ち上がり時間をもった kV レンジの高電圧インパルスを生じます。これらの高電圧スパイクの強度は、部分放電(PD)の少なくとも 1000 倍にもなり、さらに部分放電(PD)とスパイクの周波数成分が重なっているため、深刻な電氣的干渉となり、部分放電(PD)の検出を困難にしています。このような駆動方式が原因で、深刻な絶縁劣化を引き起こす可能性があるにもかかわらず、VS-PWM 給電モータでの部分放電 (PD) 検出は長い間の課題でした。本稿では、VS-PWM 駆動のモータの固定子巻線での部分放電 (PD) を測定する際の課題と、新しく開発された測定システムについて説明します。12.5MW と 45MW の圧縮モータの結果を示します。

I. はじめに

中圧/高電モータ (2.4kV~13.8kV) で、パルス幅変調 (VS-PWM) 駆動電源の採用が増加しています。負荷転流型インバータ装置や電流 PWM 方式などの他の方式も使用できますが、コストの問題から VS-PWM ドライブが一般的になりつつあります。残念ながら、これらの駆動装置は固定子巻線に絶縁問題を引き起こしています[1-7]。これはこれらのインバータが、双極性で立ち上がり時間が短く、繰り返しの早い電圧パルスを生じるためです。中圧/高圧の固定子巻線におけるこの影響を改善するために、コンバータには多段式の方式を実装しています。以下で説明するように、ドライブからの電圧インパルスは、固定子の絶縁システムの寿命を加速します[4-7]。ほとんどの場合、経年劣化が進行するにつれて、部分放電 (PD) が増加します。したがって、従来の商用周波数モータと同様に、これらの中圧/高圧モータ用の信頼性のあるオンライン部分放電 (PD) 検出方法が望まれています。残念なことに、多段 VS-PWM 駆動で発生する 1,000~3,000V のインパルスの影響で、従来の部分放電(PD)検出器のノイズ分離機能では部分放電(PD)パルス(1,000mV)をノイズパルスから分離できません。多段 VS-PWM 駆動からの電圧インパルスの立ち上がり時間は 500ns 以上になります。本書では、VS-PWM 駆動のモータでオンライン部分放電(PD)検出

を実現する際の技術的課題について説明し、IFD モータの動作に関する応用例を示します。

II. 型巻固定子におけるインバータ駆動の結果

過去 10 年の経験から、VS-PWM インバータからの電圧インパルスは、固定子絶縁システムの各構成要素を個々に劣化させる可能性があることを示しています。これらの有害作用は他の場で詳細に記述されています[6]が、簡単には；

A. 素線絶縁部の劣化

素線絶縁部にヴォイドがあり、電圧が十分な大きさであれば部分放電(PD)が発生します。このメカニズムは、部分放電(PD)に非常に強いマイカペーパーが素線絶縁材として使用されている場合には、型巻固定子に VS-PWM を応用してもあまり問題になりません。

B. Ground and Phase Insulation 耐地絶縁と相間絶縁

立ち上がり時間の短いスイッチング電圧と、関連する伝送系からの反射効果で電圧が倍になり、結果として rms 電圧に対するピーク電圧対の比は、正弦波電圧の従来比 1.4 よりも大きくなります[4,6]。ピーク電圧が高くなると、主絶縁の部分放電(PD)の繰り返しと振幅が増し、経年変化が加速します。さらに、部分放電(PD)パルス数は、スイッチング周波数が 1000Hz 以上なので、結果として生じる各インパルスがヴォイド内に部分放電(PD)が発生する可能性があり、従来の 50 / 60Hz モータの場合よりも多くなります。

C. 電界緩和コーティング

インバータは高周波電圧を発生するので、接地絶縁部を通過する容量性電流は電力周波数に比べて比較的高くなります。高周波の容量性の電流は、電力周波数巻線と比較して、コーティング部で大きく局所的な I^2R の損失をもたらします[4-7]。

その結果、VS-PWM インバータ給電モータの電界緩和層は、結果として高温になるため、50 / 60Hz 巻線の層よりもはるかに速く劣化する可能性があります。電界緩和コーティングが劣化すると、そこで部分放電(PD)が発生します。

III. IFD モータのオンライン部分放電(PD)計測

従来のモータのオフラインおよびオンライン部分放電(PD)試験は、さまざまな測定技術を使用して一般的に実施されてきました。使用される様々な方法は、大部分が標準化されています[8]~[10]。しかし、VS-PWM タイプの駆動装置は、立ち上がり時間がかなり短い電圧インパルスが発生します。このような駆動装置は、1000~1500V の DC 電圧をスイッチングする IGBT (または類似の) スwitchング・トランジスタを使用します。最悪の場合で

は、電路電圧の反射が 2 倍となり、インパルス電圧は最大 3000V になることがあります。中圧/高圧インバータにはいくつかのレベルがあるので、これらのインパルスの立ち上がり時間は、約 500ns かそれ以上と測定されます。フーリエ変換を使用すると、立ち上がり時間 500ns のインパルスは、約 600kHz までの周波数を発生します。将来の VS-PWM ドライブは、スイッチング時間が短くなりスイッチング電圧も高くなるので状況は悪化しそうです。

これらの急峻なパルスは、部分放電(PD)信号の 1000 倍（または 60dB）の振幅を有する一方で、部分放電(PD)と同様の周波数成分を有するので問題があります。商用周波数での部分放電(PD)測定では、mV の部分放電(PD)パルスは、通常、単極ハイパスフィルタを使用して 50 / 60Hz の高電圧から分離されます。VHF 領域で動作する部分放電(PD)検出器では、PD の大きさ（100kPa の空気中で約 3ns の立ち上がり時間を有する）はほとんど影響を受けませんが、高電圧（50 / 60Hz）での検出では<10mV に減少してしまいます。対照的に、40MHz より低いカットオフ周波数を有する単極ハイパスフィルタにより、立ち上がり時間 500ns で、3000V のインパルスは約 10 ボルトまでしか減衰しません。HF（3～30MHz）および LF（<3MHz）の範囲で動作する検出器では、電圧インパルスからの多くの残留成分があります。したがって、残留成分を典型的な部分放電(PD)レベルよりも小さくするために、インパルス電圧をさらに 60dB 程度に抑制するための追加の電子的または受動的なフィルタ、あるいは他の手段が必要になります（VHF 測定法を使用すると、重要な部分放電(PD)の強度は 100mV になります[7]）。

この問題を回避し低圧 IFD モータで部分放電(PD)検出を可能にする方法は、他の場所で説明されています[11]。しかし、[3]で述べたように、低圧乱巻モータで成功した方法は、中圧/高圧モータには有効ではないかもしれません。

中圧/高圧 VS-PWM モータにおける部分放電(PD)検出の別の実際的な問題は、交流正弦波に対して部分放電(PD)を表示することが従来的であるため、インバータ由来の基本周波数に比例した電圧を提供することです。従来のモータでは、商用周波数の正弦波を部分放電(PD)カプラから抽出し、90 度の位相シフトに対して位相を補正しました。基本 AC 電圧に重畳された高電圧インパルスを用いて、基本電圧に確実に同期させることは経験的に困難であることが示されています。基本周波数の周波数は広い範囲（例えば、10～60Hz）にわたって変化するので、極端に狭い帯域のフィルタは動作しません。容量性の分圧器から得られる典型的な電圧基準信号の一例を図 1 に示します。この電圧出力の特性は、位相基準としてはほとんど役に立ちません。容量性の分圧器を使用し、カットオフ周波数を下げるためのフィルタリング機能に追加のキャパシタを導入することで、この問題は解決できます（図 2）。

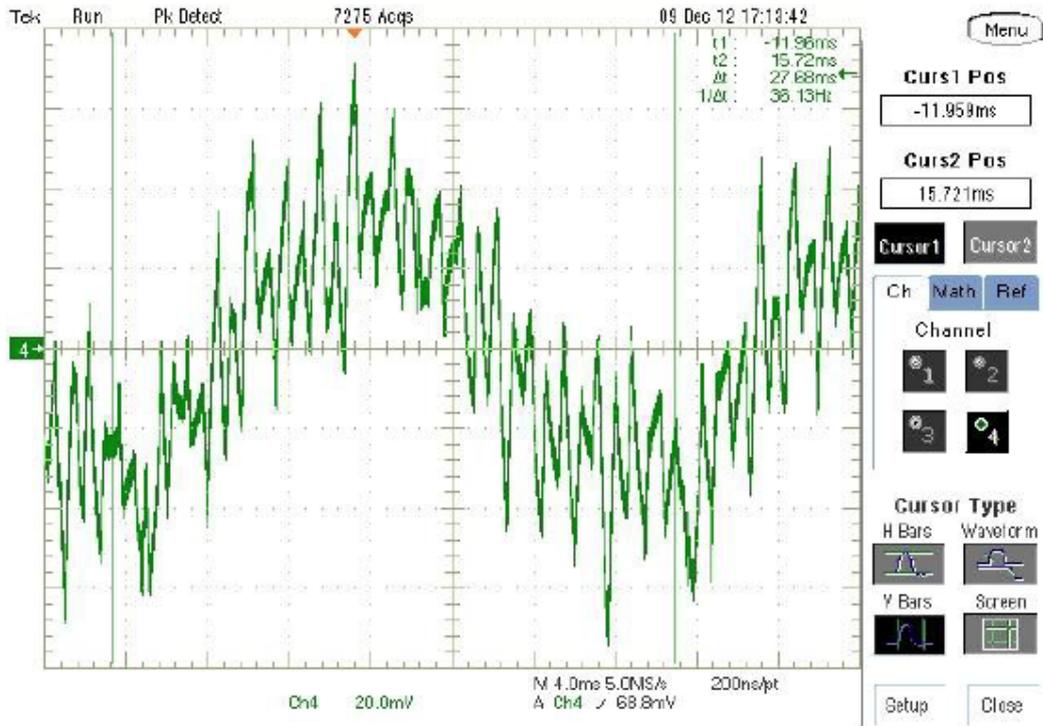


図1 モータ端子のキャパシタ式分圧器から得られる電圧基準信号の例。

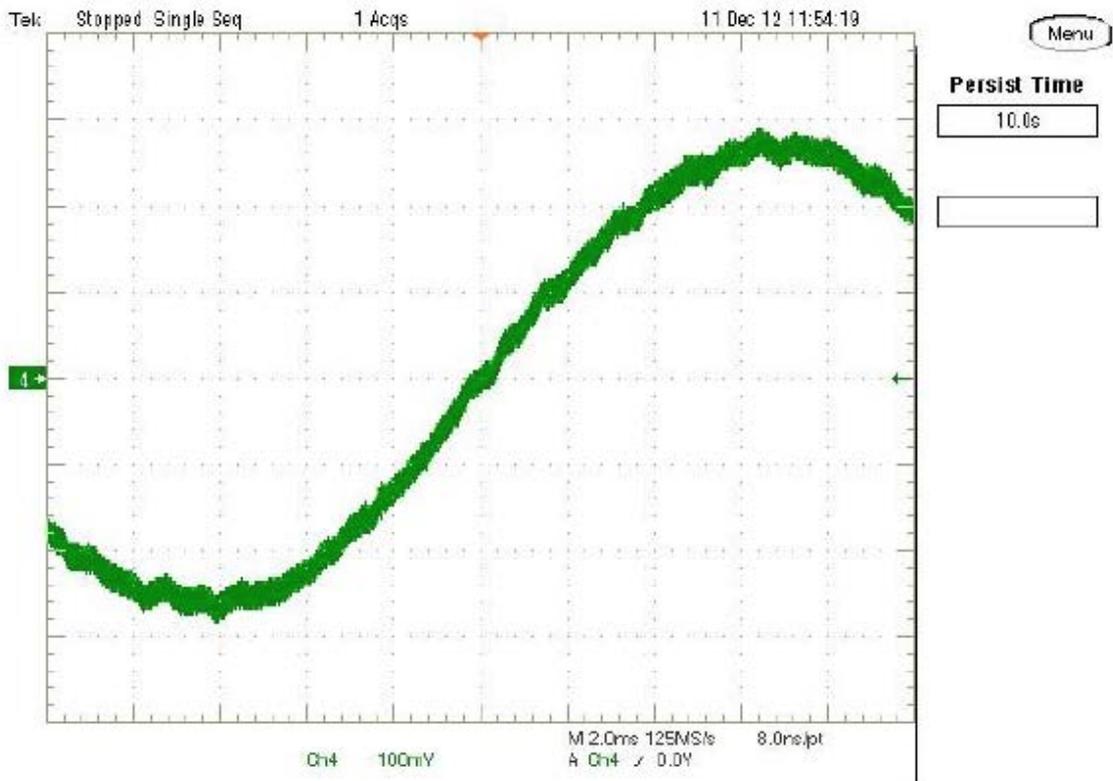


図2 フィルタ回路を変更した容量性分圧器からの信号。

IV. 中圧および高圧インバータ駆動用のオンライン部分放電 PD システム

この論文で説明している測定値を得るために使用したシステムは、低電圧固定子用に開発された UHF システムではなく、従来の VHF オンライン部分放電(PD)検出器に基づいています。80pF,16kV のコンデンサはマイカを分散した誘電体を使用しており、インパルス・フラッシュオーバー電圧 >100KV で、回転機械のオンライン部分放電(PD)センサに要求される IEC のすべての要件 (IEC 60034-27-2 と IEEE 1434) を満たしています。(図 3) 図 4 は、フィルタ無し (茶色のトレース) と 500kHz フィルタ有り (紫色トレース) の部分放電(PD)センサの出力、およびフィルタ有りの電圧基準信号 (緑色トレース) を示します。この場合、インバータからの電圧スパイクは 20V 以上です。

上記のように、VS-PWM 駆動モータで信頼できるオンライン部分放電(PD)モニタリングを実施する上での実際的な課題は、位相分解測定を可能にするための電圧基準信号をどのように得るかです。最新の部分放電(PD)測定機器のほとんどは、機能するにはそのような信号を必要としています。いくつかのプロトタイプの設定では、150Hz 以下の周波数範囲で最適化した容量性分圧器をインバータ出力に配置しました。しかしながら、インバータはモータから数百メートルのところに設置されることが多く、設置の困難さだけでなく、検出された高周波信号の減衰も引き起こすので、信頼性の高い測定を妨げる可能性があります。

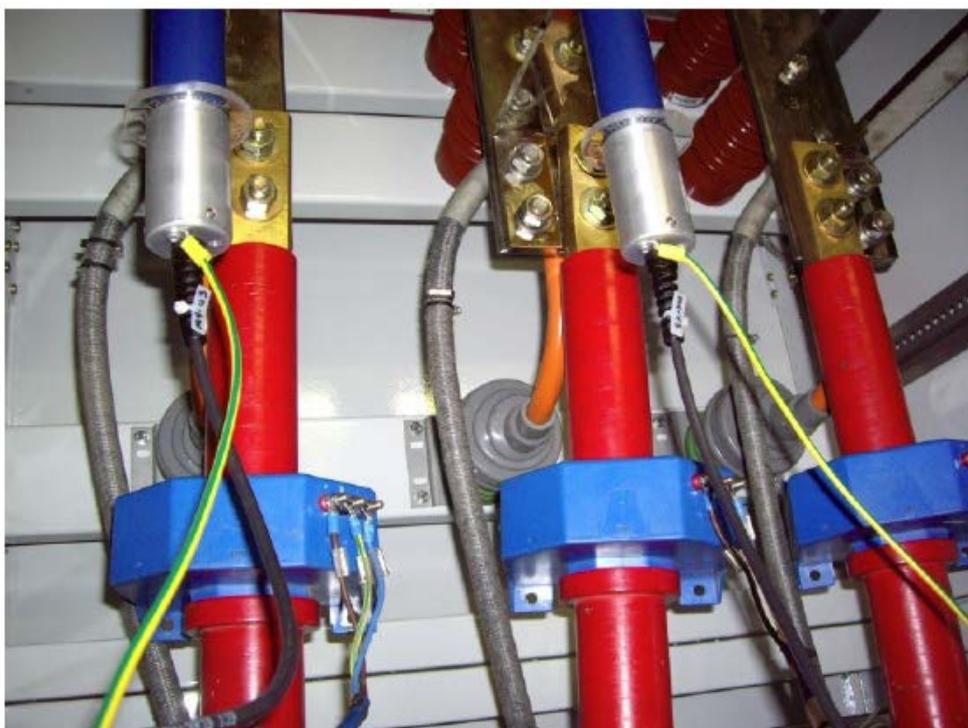


図 3 モータ端子への 80pF 容量センサの取り付け。

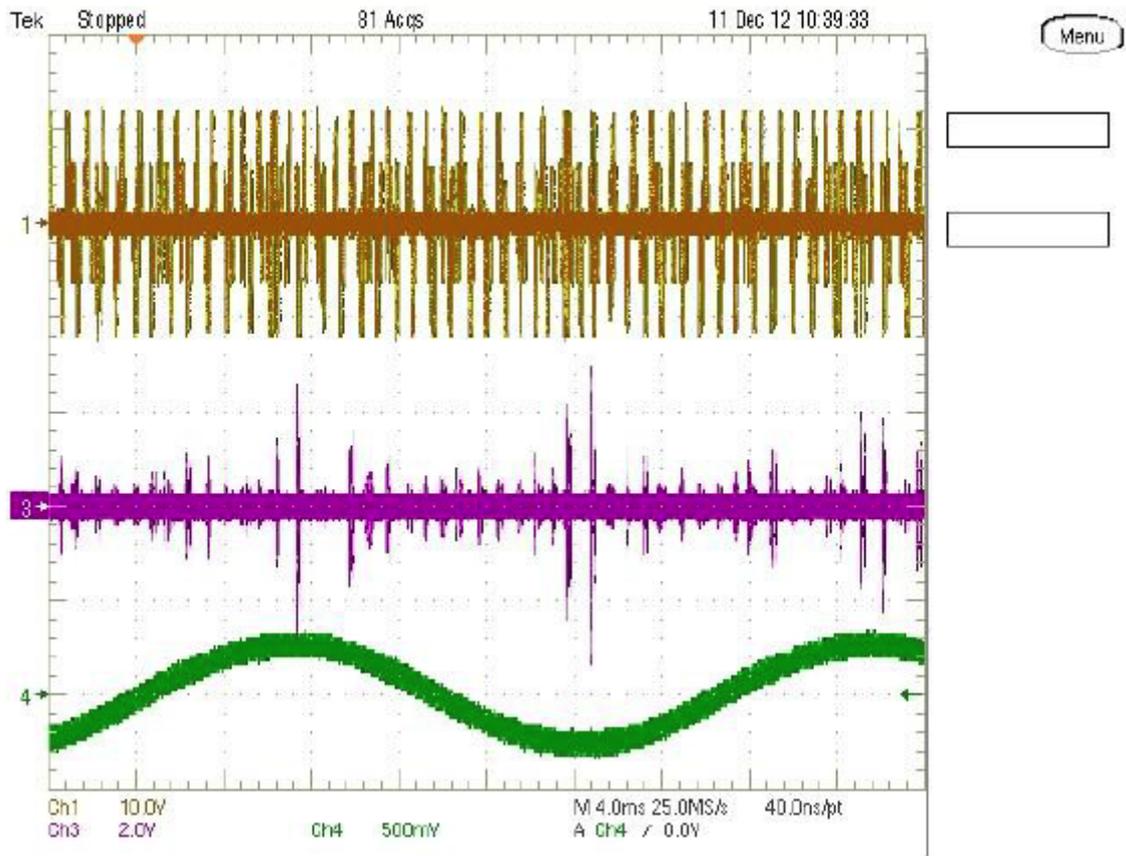


Fig. 4: Oscilloscope traces from a 12.5 MW, 3 kV motor at the output of the PD sensors and capacitive dividers measured across a 50 ohm resistor.

図4 12.5MW、3kVモータのPDセンサー出力と、50オーム抵抗器で測定された容量分圧器のオシロスコープのトレース。上の2つのトレースは、それぞれフィルタ無しとフィルタ有りの部分放電(PD)信号とノイズ信号を表します。

下のトレースは、ドライブ出力で容量性分圧器のA相（1目盛5V）で測定されたAC電圧です。横軸1目盛りあたり1ミリ秒です。

V. 事例

上記のVHF PD検出システムをいくつかの12.5MW,3kV圧縮モータに配備しました。高電圧分圧器を使用して固定子で測定されたインパルス電圧の波形を図4に示します。（下のトレース）。図4は、3つある部分放電(PD)センサのうちの一つからのフィルタ有りとフィルタ無しの信号を示す。

図 5 は、1つのモータの3相からの出力例を示します。図 5 は、重大な部分放電(PD)が存在していないことを示しています。PRPD プロット上で表示されているパルスは、駆動システムからの高電圧インパルスの残留成分です。パルスと位相位置との間には相関が無いことがわかります。このモータ固定子巻線は新しいので、比較的低電圧の機械の部分放電(PD)が少ないことは驚くべきことではありません。ドライブからの電氣的干渉を低減するための努力したにもかかわらず、ノイズパルスが存在していることは、運転中の IFD モータの部分放電(PD)測定を行うことが重要であることをさらに示唆しています。

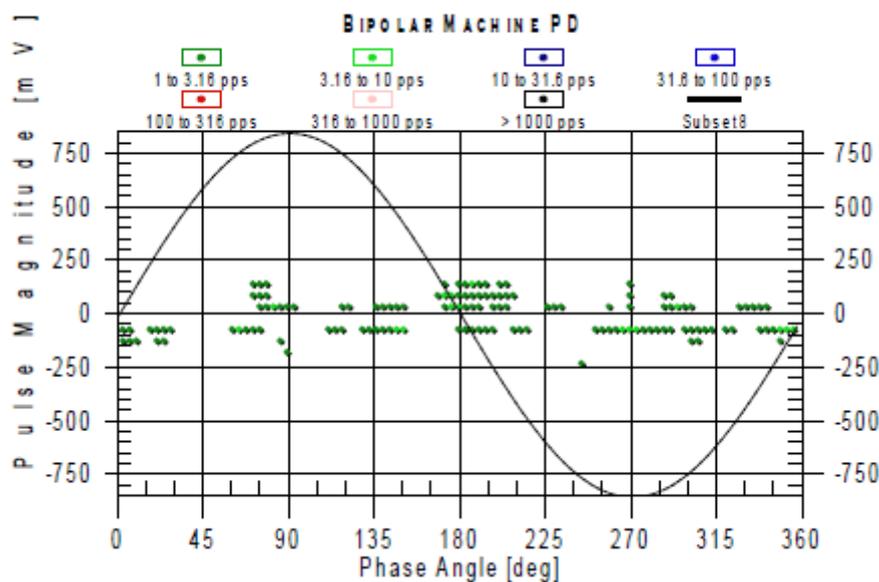


図. 5(a)

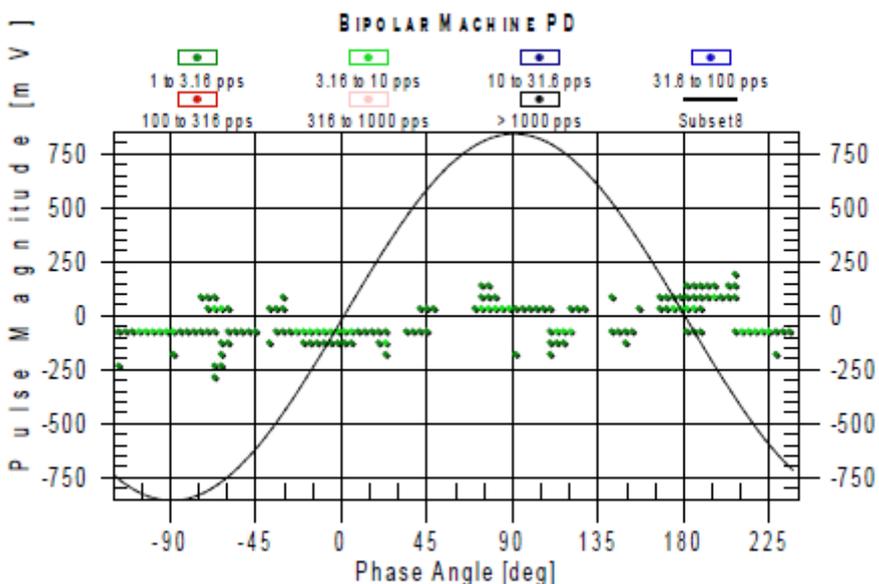


図. 5(b)

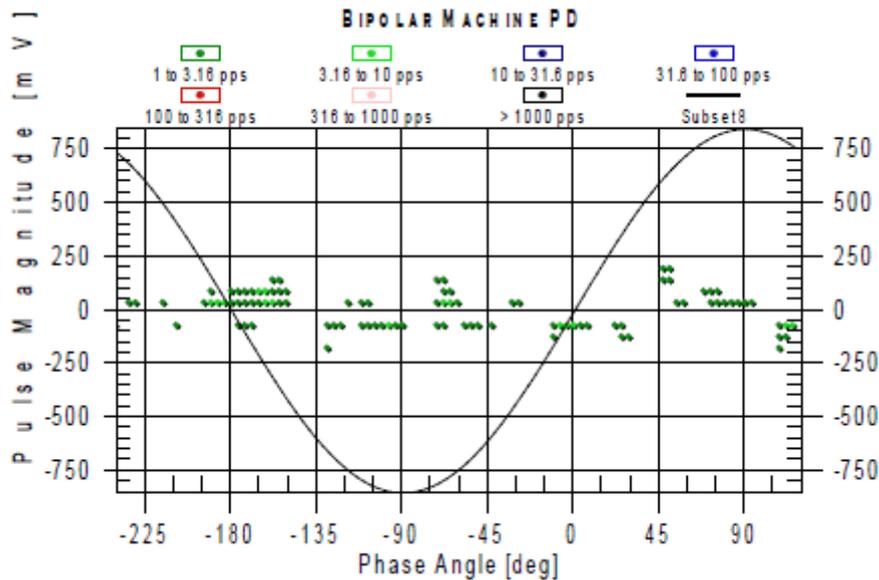
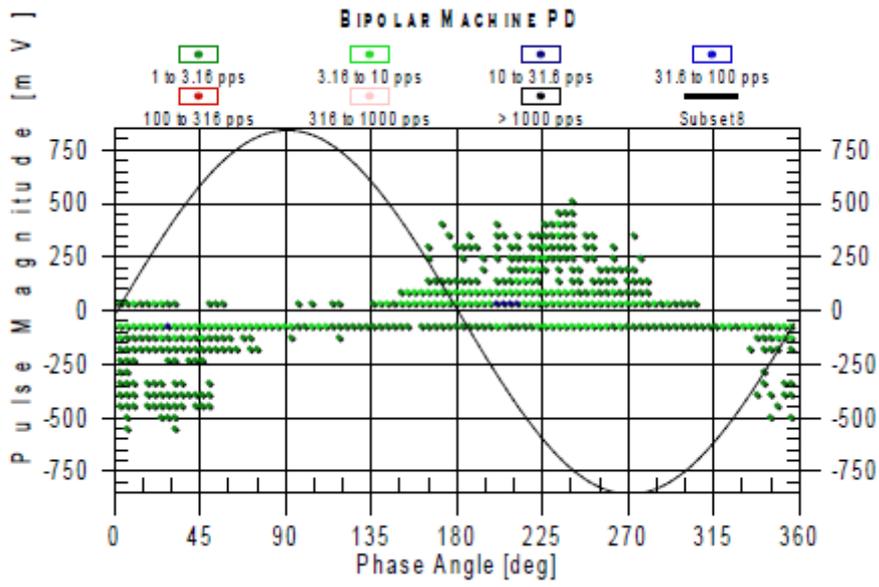


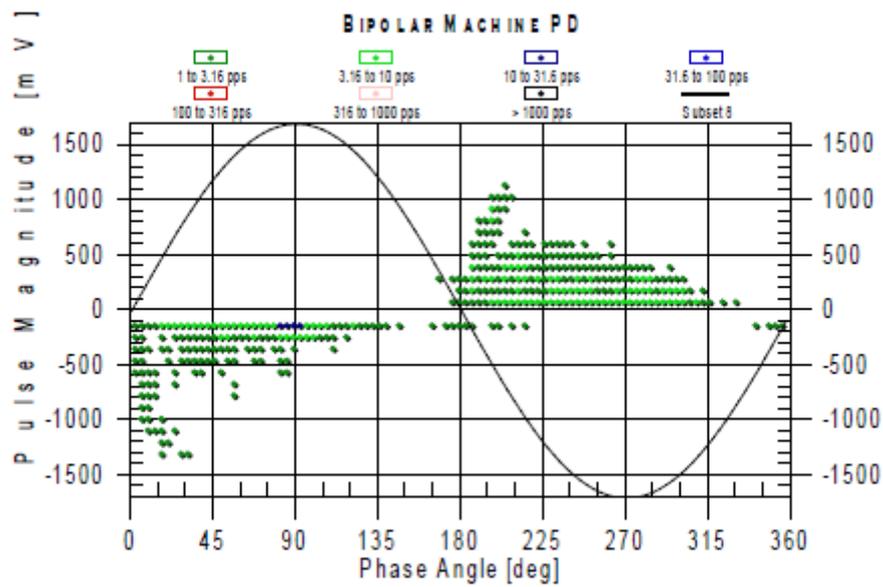
図. 5(c)

図 5: VS-PWM コンバータによって給電された 12.5MW,3kV モータの 3 相で検出された信号。

VS-PWM ドライブによって給電された、いくつかの 45MW、7.2kV コンプレッサーモーターでオンライン部分放電(PD)試験を実施しました。 図 6 は、運転中のモータで、改修した VHF 検出器を用いて測定して位相分解した部分放電(PD)信号を示します。これらのケースでは、図 6 の部分放電(PD)プロットの表示は、商用周波数での測定から得られるものと類似した特性データを示しています。 図 6 に含まれるデータを更に検討すると、これらのモータで記録された部分放電(PD)のピークの大きさは 500~1200mV の範囲であることを示しています。 これらの値を、400,000 を超えるオンライン部分放電(PD)試験結果を含むデータベース[12]と比較すると、部分放電(PD) のピークが 350mV を超えた時は（この電圧クラスのモータでは）、更にオフライン試験と検査を実施することが適切であることを示しています。その結果、これらの固定子巻線は重大な部分放電(PD)が発生しているようです。



⊗ 6(a)



⊗ 6(b)

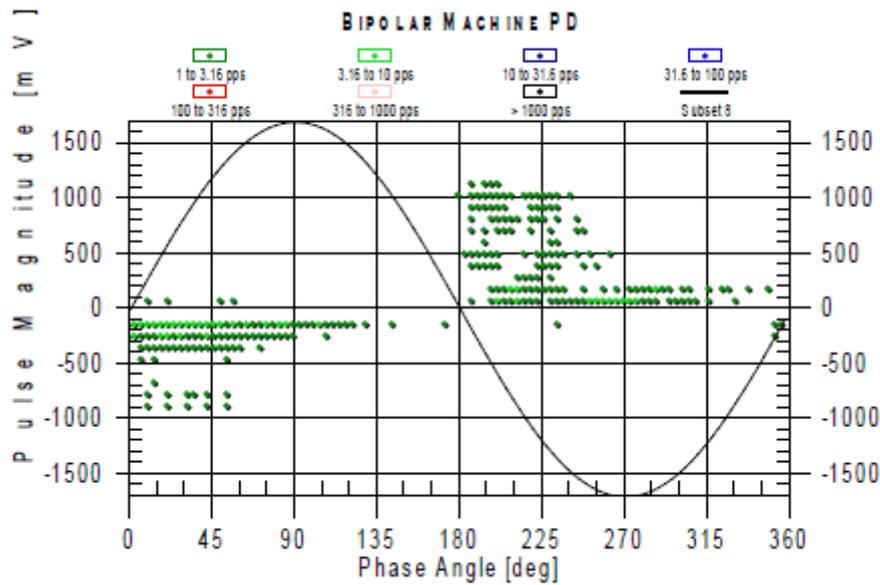


図. 6(c)

図6 VS-PWM コンバータから給電された3台の異なる7.2kV、45MW モータについて改修したVHF 検出器からのAC 相分解した部分放電(PD)パターン。色は部分放電(PD)パルスの繰り返しレートを表しています。

VI. 結論

1. より新しいVS-PWM 駆動方式のモーターでオンライン部分放電(PD)測定が可能となったが、駆動エレクトロニクスに付随する高電圧インパルスを抑制するためにはかなりの努力が必要となります。さらに、信頼できる位相基準信号を得ることもまた容易ではありません。
2. これらの課題を考慮に入れて、従来のオンラインVHF 式部分放電(PD)システムを改修して、VS-PWM ドライブに接続した3kV および7.2kV の複数の固定子巻線の部分放電(PD)を測定しました。
3. 現在までに得られた結果は有意義ですが、これらのドライブから得られる部分放電(PD)パルスパターンをよりよく理解するためには、さらなる設置およびデータが必要です。

参考文献 ；

- [1] E. Persson, "Transient Effects in Applications of PWM Inverters to Induction Motors," IEEE Trans. Industry Applications, p 1095, Sept. 1992.
- [2] IEC 60034-18-41, "Rotating electrical machines - Part 18-41: Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters".
- [3] G. C. Stone, I. Culbert and S. R. Campbell, "Progress in On-Line Measurement of PD in Motors Fed by Voltage Source PWM Drives," in Proceedings of IEEE Electrical Insulation Conference, Philadelphia, June 2014, pp 172-175.
- [4] IEC 60034-18-42, "Rotating electrical machines: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters".
- [5] E. Sharifi, S. Jayaram, E. Cherney, "Analysis of Thermal Stresses in Medium Voltage Motor Coils Under Repetitive Fast and High Frequency Pulses", IEEE Trans DEI, 2010, pp 1378-1384.
- [6] M. Stranges, G.C. Stone, D. Bogh, "Voltage Endurance Testing of Stator Insulation Systems for Inverter Fed Machines", IEEE Industry Applications Magazine, Nov 2009, pp 12-18.
- [7] G. C. Stone et al, "Electrical Insulation for Rotating Machines – Second Edition", Wiley – IEEE Press, 2014.
- [8] IEC 60034-27, "Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines".
- [9] IEC 60034-27-2, "On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines".
- [10] IEEE 1434, "Guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery".
- [11] IEC 61934, "Electrical insulating materials and systems – Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses".
- [12] V. Warren, "Partial discharge testing: a progress report", Proceedings of 2014 Conference on Online Monitoring of Electrical Assets, Austin, TX, December 2014.

Case Studies in On-Line Measurement of PD in Motors Fed by Voltage Source PWM Drives

G.C. Stone, I. Culbert, H.G. Sedding
Qualitrol-Iris Power
Mississauga, Ontario, Canada

Abstract— On-line partial discharge (PD) measurement is now widely applied to motors rated 6 kV and above that are fed from the 50/60 Hz power system. However, during the past several years, many motors are being powered from inverters which facilitate variable speed motors to improve process efficiencies. One of the drives now being used is of the voltage source, pulse width modulation (VS-PWM) type. Such drives generate high voltage impulses in the kV range with risetimes in the sub-microsecond range. These high voltage spikes are a form of severe electrical interference which can make the detection of PD (with magnitudes 1000 x smaller) difficult due to the overlapping frequency content in PD and the spikes. Thus, PD detection on VS-PWM fed motors has been a challenge in spite of the serious insulation aging that such drives may cause. This paper outlines the challenges in measuring the stator winding PD in motors fed by VS-PWM drives and describes a newly-developed measurement system. Results from 12.5 MW and 45 MW compressor motors are presented.

Keywords— *Partial discharge, variable speed drives, stator windings*

I. INTRODUCTION

The application of voltage source, pulse width modulated (VS-PWM) drives, on medium and high voltage motors (2.4 kV to 13.8 kV) is increasing. Other drive topologies, such as load commutated and current source pulse width modulated schemes are also available, however, due to cost considerations, VS-PWM drives are becoming more common. Unfortunately, these drives have resulted in stator winding insulation problems [1 - 7]. This observation is due to such inverters producing bipolar, short risetime voltage pulses with a high repetition rate. In order to ameliorate this effect in medium and high voltage stator windings, multi-level topologies for converters have been implemented. Thus, as the rated voltage increases so does the number of levels. As discussed below, the voltage impulses from the drive can lead to rapid stator insulation system aging [4 - 7]. In most cases, as the aging progresses the PD activity increases. Thus, just as for conventional power frequency motors, there is a desire for reliable on-line PD detection methods for these medium and high voltage motors. Unfortunately, conventional electrical PD detectors tend to be overwhelmed by the 1000-3000 V impulses created by multi-stage VS-PWM drives. The risetime of the voltage impulses from the multi-stage VS-PWM drives tend to be 500 ns or longer. This paper describes the technical challenges in implementing on-line PD detection

on motors fed by VS-PWM drives and provides some examples of application on operating IFD motors.

II. CONSEQUENCES OF INVERTER FED DRIVES ON FORM WOUND STATORS

Experience over the past decade indicates that the voltage impulses from the VS-PWM inverters can age each component of the stator insulation system differently. These adverse effects were described in detail elsewhere [6], however, briefly,

A. Turn Insulation Deterioration

If there are voids associated with the turn insulation and if the interturn voltage is of sufficient magnitude, then PD can occur. This mechanism is less of a concern in form-wound stators for VS-PWM applications if mica paper turn insulation is used, which is very resistant to PD.

B. Ground and Phase Insulation

The short-risetime switching voltage and the associated transmission line reflection effects may lead to voltage doubling, which in turn, results in the peak-voltage to rms-voltage ratio being higher than the 1.4 ratio that is present with sinusoidal voltage [4, 6]. The higher peak voltage will increase the repetition and magnitude of groundwall insulation PD and thus accelerate aging. Further, the number of PD pulses may also be higher than for a conventional 50/60 Hz motor since the switching frequency is 1000 Hz or more and each resulting impulse may create PD in a void.

C. Stress Relief Coatings

Since inverters generate high-frequency voltages, the capacitive currents through the ground insulation are relatively high compared to power frequency. The high-frequency capacitive currents will result in high local I^2R losses in the coatings compared to power frequency windings [4 - 7]. The result is that the stress control layers in VS-PWM inverter fed motors are likely to deteriorate much faster than the layers in 50/60 Hz windings due to the resulting high temperature. As the stress relief coatings deteriorate, they will create PD activity.

III. MEASURING PD ON-LINE IN IFD MOTORS

Off-line and on-line PD testing of conventional motors has been commonly practiced using a range of measurement technologies. The various methods employed are largely standardized [8 - 10]. However, the VS-PWM type of drive produces significant short-risetime voltage impulses. Such drives use IGBT (or similar) switching transistors, which switch DC voltages of 1000 – 1500 V. With worst case transmission line voltage reflections of 2 times, impulse voltages may be up to 3000 V. Due to the several levels of medium and high voltage inverters, the risetime of these impulses has been measured to be about 500 ns or more. Using a Fourier transform, a 500 ns risetime impulse will produce frequencies up to about 600 kHz. Future VS-PWM drives are likely to have shorter switching times and higher switching voltages, making the situation worse.

These steep-fronted pulses are problematic because they have frequency components that are within the range of those associated with PD while having magnitudes 1000 times (or 60 dB) higher than that of PD signals. In power frequency applications, the mV PD pulses are most commonly separated from the high voltage 50/60 Hz using a single-pole high-pass filter. With a PD detector operating in the VHF range, the high voltage 50/60 Hz is reduced to <10 mV, while the magnitude of the PD (which in air at 100 kPa has a risetime of about 3 ns) is largely unaffected. In contrast, a 500 ns risetime, 3000 V impulse may be reduced to only about 10 volts by a single pole high pass filter with a lower cut-off frequency of 40 MHz. Detectors operating in the HF (3-30 MHz) and LF (<3 MHz) range will have even higher residuals from the voltage impulses. Thus, additional electronic or passive filters or other means are needed to further suppress the impulse voltage another 60 dB or so in order to reduce the residual to less than the typical PD levels (using a VHF measurement method, significant PD has a magnitude of several hundred mV [7]).

Methods to circumvent this problem and enable PD detection on low voltage IFD motors are described elsewhere [11]. However, as described in [3], the methods that have proved successful for low voltage random-wound motors may not be effective for medium and high voltage motors.

Another practical issue with PD detection in medium and high voltage VS-PWM motors is providing a voltage proportional to the fundamental frequency coming from the inverter, since it is traditional to display PD with respect to the AC sinewave. For conventional motors, the power frequency sinewave can be extracted from the PD coupler, and phase corrected for the 90 degree phase shift. Experience has shown that it is difficult to reliably synchronize to the fundamental voltage with the high magnitude voltage impulses superimposed on the fundamental AC voltage. An extremely narrow band filter would not work since the frequency of the fundamental voltage varies over a wide range (for example 10-60 Hz). An example of a typical voltage reference signal obtained from a capacitive divider is shown in Fig. 1. The characteristics of this voltage output are such that it is of little

use as a phase reference. This problem can be solved using a capacitive voltage divider and by introducing additional capacitance to the filtering to lower the cut off frequency, Fig. 2.

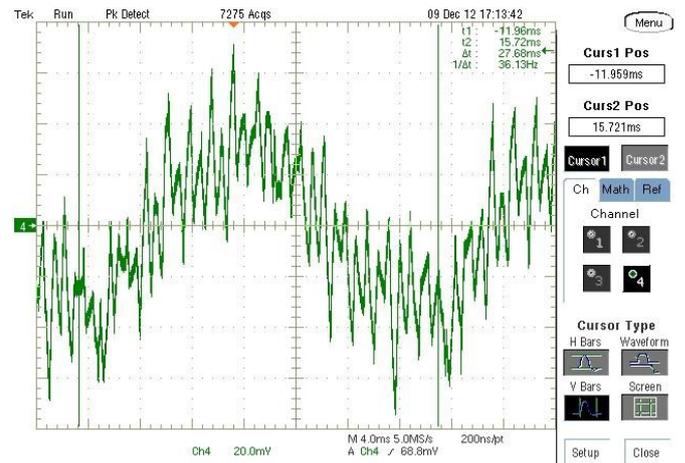


Fig. 1: Example of voltage reference signal obtained from capacitive divider at motor terminals.

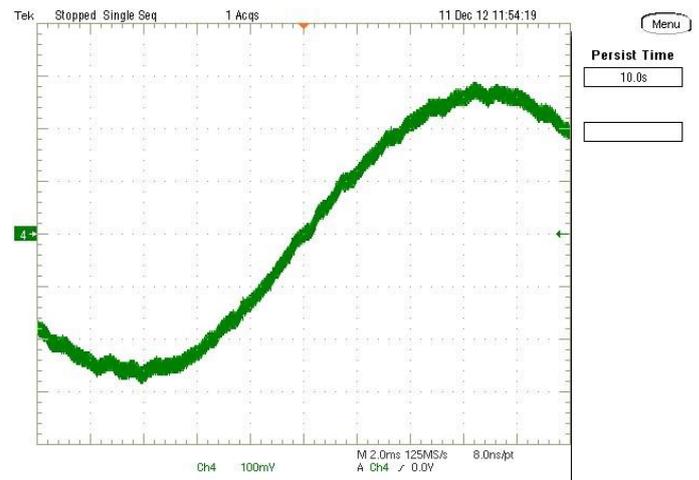


Fig. 2: Signal from the capacitive divider with changes to the filter circuit.

IV. AN ON-LINE PD SYSTEM FOR MEDIUM AND HIGH VOLTAGE INVERTER DRIVES

The system used to derive the measurements discussed in this paper was based on a conventional VHF on-line PD detector rather than on the UHF system developed for low voltage stators. The 80 pF, 16 kV capacitors use a mica splitting dielectric which yield impulse flashover voltages >100 kV and meet all the requirements of IEC 60034-27-2 and IEEE 1434 for rotating machine on-line PD sensors (Fig. 3). Fig. 4, illustrates the output of these PD sensors without filtering (brown trace), with a 500 kHz filter (purple trace) and the filtered voltage reference signal (green trace). In this case, the voltage spikes from the inverter are over 20 V.

As mentioned above, a practical challenge in implementing reliable on-line PD monitoring of VS-PWM drive motors is the derivation of a voltage reference signal to

enable phase resolved measurements. Most modern PD instruments require such a signal in order to be functional. In several prototype installations, a capacitive voltage divider was optimized for the frequency range 150 Hz and below and placed at the inverter output. However, often the inverter is located up to several hundred metres from the motor which causes not only installation difficulties but also attenuation of the detected high frequency signals that may interfere with reliable measurements.

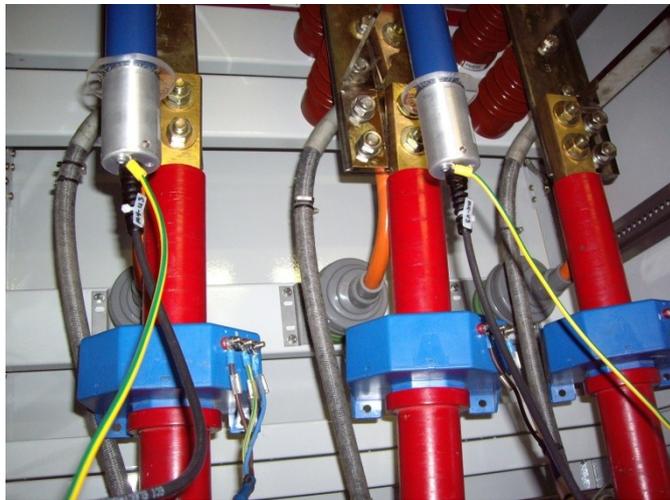


Fig. 3: Installation of the 80 pF capacitive sensors on the motor terminals.

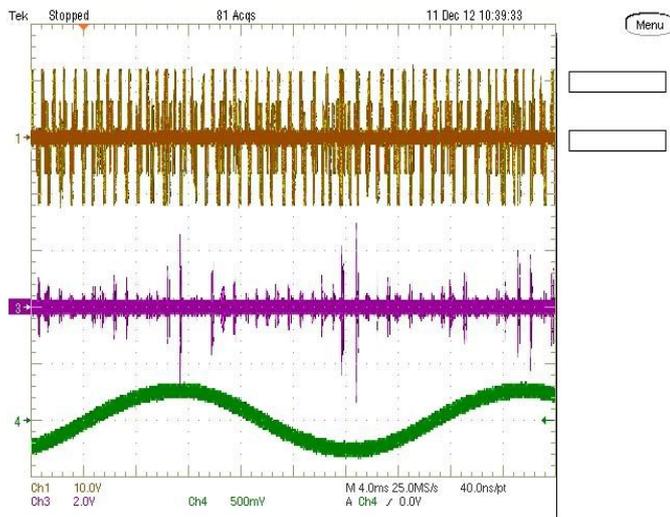


Fig. 4: Oscilloscope traces from a 12.5 MW, 3 kV motor at the output of the PD sensors and capacitive dividers measured across a 50 ohm resistor. The top two traces represent the PD and noise signals, unfiltered and filtered respectively. The bottom trace is the AC voltage measured on phase A (5 V per division) from a capacitive voltage divider at the drive output. The horizontal scale is 1 ms per division.

V. CASE STUDIES

A VHF PD detection system, as described above, was deployed on a number of 12.5MW, 3 kV compressor motors.

The waveform of the impulse voltage measured at the stator using a high voltage divider is shown above in Fig. 4

(lower trace). Fig. 4 also shows the unfiltered and filtered signals from one of the three PD sensors.

Fig. 5 provides an example of the output from three phases of one of the motors. Examination of Fig. 5 indicates that there is no PD of any significance present. The pulses evident on the PRPD plots are the residual components of the high voltage impulses from the drive system. Note that there is no correlation between the pulses and the phase position. This motor stator winding is new so the lack of PD on a relatively low voltage machine is perhaps not surprising. The presence of noise pulses, despite significant efforts to reduce electrical interference from the drive, is a further indication that performing PD measurements on operating IFD motors is non-trivial.

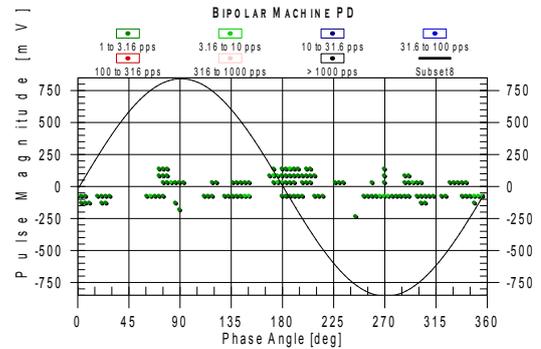


Fig. 5(a)

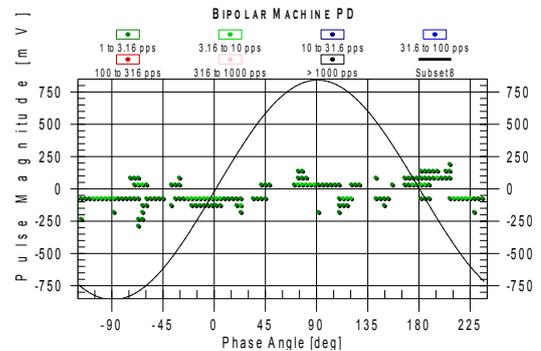


Fig. 5(b)

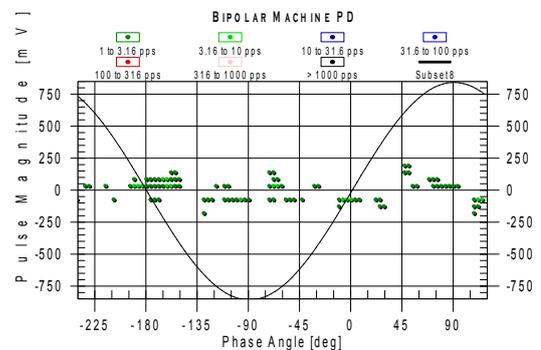


Fig. 5(c)

Fig. 5: Signals detected from the three phases of a 12.5 MW, 3 kV motor fed by a VS-PWM converter.

On-line PD testing was performed on several 45 MW, 7.2 kV compressor motors fed by VS-PWM drives. Fig. 6 illustrates the phase-resolved PD signal measured by the modified VHF detector on three of these motors during operation. Examination of the PD plots in Fig. 6 shows that, in these cases, they exhibit similar characteristics data derived from measurements in power frequency applications. Further inspection of the data contained in Fig. 6 shows that the peak PD magnitudes recorded on these motors ranges from 500 to 1200 mV. Comparison of these values with a database containing over 400,000 on-line PD test results [12] shows that when the peak PD exceeds 350 mV (for this voltage class of motor), further off-line tests and inspections are warranted. Consequently, these stator windings appear to have significant PD activity.

VI. CONCLUSION

1. On-line motor PD measurement on newer VS-PWM drives can be achieved, however, significant effort is required to suppress the high voltage impulses associated with the drive electronics. Further, derivation of a reliable phase reference signal is also non-trivial.
2. Taking into account these challenges, a conventional on-line VHF PD system was modified to measure the stator winding PD on a number of 3 kV and 7.2 kV stators connected to VS-PWM drives.
3. Results obtained to date are promising; however, further installations and data are required in order to better understand the PD pulse patterns obtained from these drives.

REFERENCES

- [1] E. Persson, "Transient Effects in Applications of PWM Inverters to Induction Motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, p 1095, Sept. 1992.
- [2] IEC 60034-18-41, "Rotating electrical machines - Part 18-41: Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters".
- [3] G. C. Stone, I. Culbert and S. R. Campbell, "Progress in On-Line Measurement of PD in Motors Fed by Voltage Source PWM Drives," in *Proceedings of IEEE Electrical Insulation Conference*, Philadelphia, June 2014, pp 172-175.
- [4] IEC 60034-18-42, "Rotating electrical machines: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters".
- [5] E. Sharifi, S. Jayaram, E. Cherney, "Analysis of Thermal Stresses in Medium Voltage Motor Coils Under Repetitive Fast and High Frequency Pulses", *IEEE Trans DEI*, 2010, pp 1378-1384.
- [6] M. Stranges, G.C. Stone, D. Bogh, "Voltage Endurance Testing of Stator Insulation Systems for Inverter Fed Machines", *IEEE Industry Applications Magazine*, Nov 2009, pp 12-18.
- [7] G. C. Stone et al, "Electrical Insulation for Rotating Machines – Second Edition", Wiley – IEEE Press, 2014.
- [8] IEC 60034-27, "Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines".
- [9] IEC 60034-27-2, "On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines".
- [10] IEEE 1434, "Guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery".
- [11] IEC 61934, "Electrical insulating materials and systems - Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses".
- [12] V. Warren, "Partial discharge testing: a progress report", *Proceedings of 2014 Conference on Online Monitoring of Electrical Assets*, Austin, TX, December 2014.

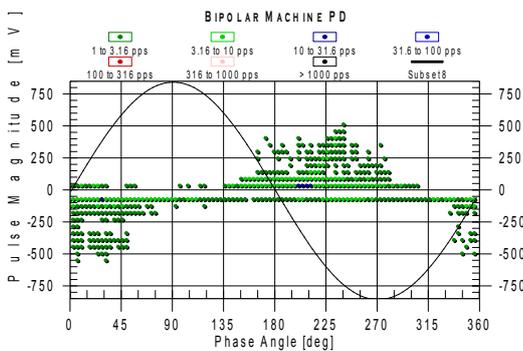


Fig. 6(a)

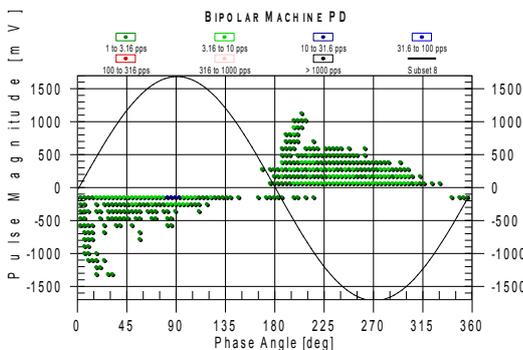


Fig. 6(b)

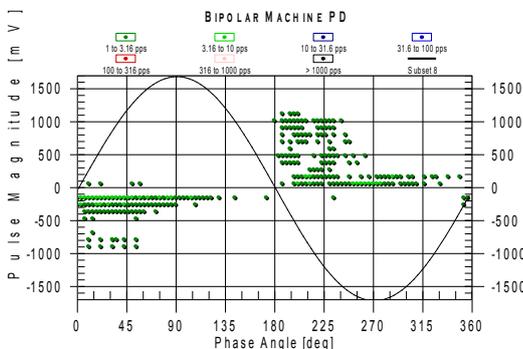


Fig. 6(c)

Fig. 6: AC phase resolved PD patterns from the modified VHF detector on three different 7.2 kV, 45 MW motors fed by a VS-PWM converter. The color displays the PD pulse repetition rate.