

負荷時タップ切換器の保守点検間隔の延長には 開発段階での広範囲に渡る長期テストが必要

Axel Krämer、Dieter Dohnal
Maschinenfabrik Reinhausen GmbH (レーゲンスブルグ)

要約

ここ数年、送配電網設備に対する技術的・経済的要求は高まり続けている。特に、可用性に関する議論と保守点検間隔の延長に対する強い要求には注目すべきである。

OLTC (on-load tap-changer: 負荷時タップ切換器)の場合、真空スイッチ技術を導入すれば、このような高度な要件を技術的に満たすことができる。20年以上に渡り真空スイッチ技術を開発してきたMRの新型OLTCを使用すれば、真空スイッチ技術の利点を利用して、従来型OLTC技術の一般的な保守点検間隔を延長できる。現在ではこの技術により、30万回という切換回数で判断する保守点検間隔が電力用変圧器のVACU-TAP® OLTC製品群の標準となり、時間的制約を受けることがなくなった。

保守点検間隔の延長見込は、開発段階で広範囲にわたって実証されなければならない。MRは、新型VACUTAP® OLTC用のテスト方法を導入したが、これはパフォーマンス実証テストに適用されていた方法であり、将来的にも適用可能な方法である。

本書では、非常に長期間隔の保守点検間隔テストを実施することにより、真空スイッチ技術と技術的安全保護策の優位性について考察する。

新型OLTCでは、従来型のネットワーク電力用変圧器で言えば、OLTCの平均切換回数を1年に1万回とした場合に30年間操作してはじめて最初の保守点検が訪れることになり、これは同時に変圧器の経済寿命も表わしている。

1 はじめに

ここ数十年の間、負荷時タップ切換器付き電力用変圧器の重要性は高まり続けており、調節された電力用変圧器は、今日のエネルギー供給網においては不可欠の運用装置である。主な新規開発は、発電および送配電業界における世界的な規制緩和によって推進されている。電力用変圧器の電圧制御は、負荷時に巻線比を変えられるOLTCの利用により可能となる。Janssen博士による第1926号特許に基づく高速抵抗タイプのOLTCは、世界中で最も広く使用されている方式である。

タップ切換操作の過程では、変圧器の負荷電流が現行送電タップから事前選択した送電タップに転送されなければならない。約50~100ミリ秒の間に行われるこの負荷転送は、ダイバータスイッチまたはセレクトスイッチにおいて、定義されたシーケンスで非アークおよびアーク接触子を接続および遮断することで実現される。

従来型OLTCにおいて、ダイバータスイッチ内のアーク接触部位が、可動式および固定式の銅または銅-タングステン接触子で構成されている。これらの接触子は、切換媒体として鉱物性絶縁油を使用しており、アーク放電により液体が炭化する。また、接触子の材質が溶出することで(接触磨耗)、液体が汚染される。ダイバータまたはセレクトスイッチ内の絶縁油はアーク消弧を主に行っているが、その他の役割として、絶縁、冷却、および潤滑剤としても使用される(参考文献/1/、/2/)。

保守点検間隔の延長について議論する際には、接触磨耗(図1を参照)とダイバータスイッチ内の液体の劣化および汚染(図2を参照)が大きな懸案事項となる。



図1: 銅-タングステン接触子の磨耗



図2: ダイバータスイッチインサートと油槽の炭素堆積物

従来型OILTAP[®] OLTCの特性を高水準に維持するには、以下の切回数と運転期間のいずれか早い方に従って保守点検を計画しなければならない。

一般的な目安:

- タップ切回数5万~10万回
- 4~7年の間隔

2 真空スイッチ技術

真空スイッチ技術は、この30年間で中電圧回路遮断機および高電流接触器において最も広く用いられる技術となった。最初のリアクタタイプの真空バルブ付きOLTCは、70年代初期に開発された。MRは、80年代中ごろに真空リアクタタイプのOLTCの製造を開始し、そこから真空スイッチ技術に関して数多くの開発を重ね、1995年に最初の抵抗タイプの真空バルブ付きOLTCの製造を開始した。その後、さらにいくつかのタイプのOLTCを設計し、現在は多様な真空バルブ付きOLTC商品群を揃えるまでになった。この真空スイッチ技術は、今ではアーク接触子が油中にある従来型の技術に匹敵する代替品となるまでになり、より優れた経済的なソリューションを提供するようになった(参考文献/3/、/4/)。

よく知られている銅-タングステンのアーク接触子に代わり真空バルブが用いられるようになった。回路遮断機に比べて切条件および要件が多様であるため、OLTC用の真空バルブは特殊な設計になっている。以下のような独特な要素がある。

- 絶縁油(またはその他の絶縁媒体)内での運転温度範囲における機械寿命とOLTCの期待寿命
- 切換パフォーマンス
- 接触子寿命
- 寸法

2.1 VACUTAP[®]技術の利点

真空バルブは気密構造である。アーク放電はこの気密空間の中で行われるため、周囲媒体、つまりOLTC内で真空バルブを使用する場合のダイバータまたはセレクトスイッチコンパートメント内の液体との間で相互作用が発生しない。以下のような利点が見られる。

- アーク放電により、ダイバータまたはセレクトスイッチコンパートメント内の液体が劣化しない。→鉱物性絶縁油を使用する場合のような炭素堆積物がOLTCに付着しない。汚れない鉱物性絶縁油が、絶縁、潤滑、および冷却剤としての機能をフルに発揮できる。寿命に至るまで優れた絶縁耐力および潤滑特性が見られる。
- 遮断特性が周囲媒体に依存しない。→絶縁油以外の流動体を使用しやすい。
- 真空バルブの場合のアーク電圧降下は、遮断中のエネルギー消費が少ないため、従来型の切換方式の場合よりも低い。→接触磨耗が減る。
- 接触面の金属蒸気の再凝結率が高い。→接触磨耗が減る。
- アーク消弧媒体が劣化しない。→真空バルブが寿命に至るまで安定した遮断特性を維持できる。
- 接触子が酸化しない。→低い接触抵抗を維持できる。

2.2 VACUTAP[®]の保守点検

前述のとおり、従来型OLTCの保守点検間隔は、切回数5万~10万回または4~7年のいずれか早い方である。ところがVACUTAP[®]では、

時間的制約を受けない最大30万回という切戻回数による保守点検間隔が可能である。ほとんどの負荷時タップ切戻器付電力用変圧器の場合、通常は切戻回数が限定的であるため、真空技術を使用すれば、OLTCの平均寿命である30~40年の運転期間中に保守点検を行わずに済む(参考文献/5/)。

3 パフォーマンステスト

VACUTAP® OLTC製品群の開発における主要課題の1つは、前述のような保守点検期間の延長をどのように実証するかであった。通常、国際規格は最先端技術を反映し、電気機器の有用性を実証するための適切なテスト方法に関する手引を提供しており、設計テスト(誘電性能、温度上昇、遮断容量、短絡電流)と耐久テスト(機械的耐久性、運転)を組合せることが多い。

3.1 国際規格

OLTCに関連する国際規格IEC 60214-1『タップ切戻器 – 第1部: パフォーマンス要件およびテスト方法』では、以下の型式テストが要求されている(参考文献/6/)。

- 接触子の温度上昇
- 切戻テスト
- 短絡電流テスト
- 遷移インピーダンステスト
- 機械テスト
- 誘電テスト

これらの型式テストは、設計テスト(誘電性能、温度上昇、遮断容量、短絡電流)と耐久テスト(機械的耐久性、運転)を組合せたものである。必要な保守点検作業および機器の寿命に関しては、特に切戻テストと機械テストが関係する。

切戻テストは2つの要素で構成される。1つは、最大定格通電状態で切戻を5万回行う運転テストである。これは必須テストであり、接触子寿命の推定が可能になる。もう1つは、最大定格通電の2倍の通電状態かつそれに相当する定格ステップ電圧で切戻を40回行うことにより、遮断容量を実証する必要がある。このステップ電圧が最大定格ステップ電圧と等しくない場合、最大定格ステップ電圧かつそれに相当する定格通電の2倍の通電状態で2度目のテスト(40回の切戻)を実施する必要がある。これらのテストの主な目的は、設計値の実証である。

機械テストでは、主に機械的耐久性を実証するために切戻を50万回行う。このテストは通常の運転状態で実施するが、接触子に電圧を印加しない。液浸型OLTCの場合、当然ながら使用する液体の中でテストを実施する必要がある。また、切戻回数のうち少なくとも半分は、75°C以上の液体温度で切戻を行う。さらに、ダイバータまたはセレクタスイッチの場合、-25°Cで切戻を100回行う。またテスト中は、製造業者のマニュアルに従って通常運転を行う。

欧州(EN)および北米(IEEE)の規格は、これらの点では同じ要件を提示している。

3.2 MRIによるVACUTAP®のテスト方法

IEC 60214-1で要求されている運転テストの結果から推定される接触子寿命は、OLTCの全用途および切戻回数10万回までの保守点検間隔については確実である。しかし、保守点検間隔の間にそれ以上の切戻を行う場合、運転テストにおいて、通常回数以上の遮断操作を行って接触子寿命を実証する必要がある。

今日のVACUTAP®は、保守点検間隔の延長だけでなく、ダイバータスイッチの寿命も延長可能である。これらは運転期間には関係なく、切戻回数に基づく。表1は、けた外れの切戻回数が見されているが、これらを設計テストで実証する必要がある。

	切戻回数
保守点検間隔	30万
真空バルブの接触子寿命	60万
ダイバータスイッチの寿命	120万

表1: VACUTAP® VRの切戻回数

当然、IEC 60214-1で述べられているテストを実施しただけでは、これらのけた外れの切戻回数を保証することはできない。したがって、MRIは、切戻テストおよび機械テストの範囲を広げた。以下で説明されているテストは、図3のVACUTAP® VRを用いて行われた。このダイバータスイッチは、1300Aの定格通電および4000Vの最大定格ステップ電圧用に設計されている。ただし、小型のVACUTAP® VVのテスト方法も同じであった。



図3: VACUTAP® VRのダイバータスイッチインサート(ダイバータスイッチの油槽部分を除く)

3.2.1 切替耐久テスト

IECで要求されている運転テストの範囲を広げ、最大定格通電状態で切替を60万回行う切替耐久テストを実施した。このテスト中に、ダイバータスイッチの遮断容量を2回実証した。5万回の切替後、切替100回ずつの遮断容量テストが合格した。1回目のテストは定格通電の2倍の通電状態およびそれに相当する定格ステップ電圧で実施し、2回目のテストは最大定格ステップ電圧およびそれに相当する定格通電の2倍の通電状態で実施した。

さらに45万回の切替を最大定格通電で行った後(総切替回数: 50万回)、100回ずつの遮断容量テストを定格通電の2倍の通電状態で繰返し行い、合格した。

図4は、VACUTAP® VRの60万回の切替耐久テストのうち最初の5万回と最後の5万回のアーク時間の分布を示している。確立されているダイバータスイッチの遮断容量の判断基準は、アーク時間の長さである。IEC 60214-1を考慮すると、 $(1.2 \div 2 \times \text{周波数})$ 秒以下のアーク時間であれば完璧である。供給周波数が50Hzの場合、この値は12ミリ秒である。テスト開始時および終了時のすべてのアーク時間が、この基準値以下であることがわかる。

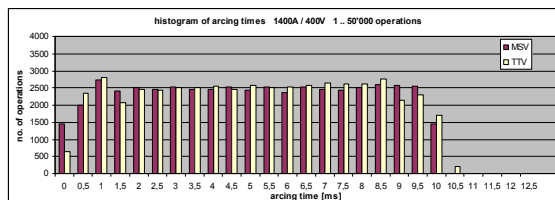


図4a: 切替0~5万回(テスト開始時)のVACUTAP® VRのアーク時間分布

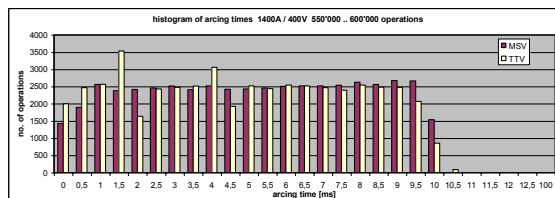


図4b: 切替55万~60万回(テスト終了時)のVACUTAP® VRのアーク時間分布

50万回の時点で、定格通電の2倍の通電状態およびそれに相当する定格ステップ電圧での100回の遮断容量テストに合格した。図5は、アーク時間の分布を示している。ここでも、すべてのアーク時間がIEC規格に準拠した範囲内であり、分布に変則性が見られない。

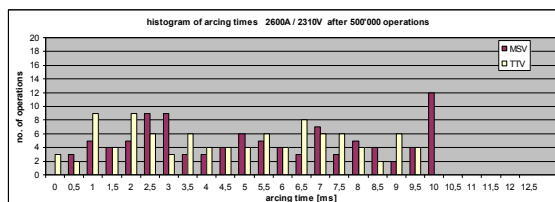


図5: 切替50万回時点の遮断容量テストにおけるVACUTAP® VRのアーク時間分布

切替回数が少なく軸の目盛が異なるため、前述の2つのテストのように分布が均一にはならないが、すべてのグラフに異常値がなく、安定した切替特性を結論付けることができる。

切替耐久テストにおいては、切替特性のほか接触磨耗も重要な関心事である。真空バルブの接触磨耗は、5万回と60万回の遮断操作後に測定した。表2は、VACUTAP® VRの2つの真空バルブの結果を示している。

最大定格通電状態でVACUTAP® VRの遮断操作を60万回行った後でも、接触磨耗が許容値を大きく下回っている。

	真空バルブ	
	メインパス	トランジションパス
許容接触磨耗	4mm	4mm
5万回切換後の接触磨耗	測定不能	測定不能
60万回切換後の接触磨耗	2mm未満	2mm未満

表2: VACUTAP® VRの切換耐久テストにおける接触磨耗

3.2.2 例外的切換条件の検証

抵抗タイプのOLTCのアーキ接触部位は、遮断接触子にオーム特性を持たせるよう設計されている。つまり、電流ゼロの開放接点間隔で生じる回復電圧が、0から開始する正弦波を描くということである。しかし、これが当てはまらない2種類のOLTCの使用法がある。1つは粗巻線とタップ巻線の調整、もう1つはHVDC変圧器でのOLTCの使用である(参考文献/7)。

粗巻線とタップ巻線を備えた設計の変圧器を使用する場合、運転サイクル中に切換操作が1回だけ存在し、粗巻線およびタップ巻線配列の漏れインダクタンスにより、トランジションコンタクトで切換電流と回復電圧の間に位相角が生じる。従来型OLTCの場合、この事例を特に考慮する必要がある。油浸タイプのアーキ接触子の場合、電流ゼロ点で位相変位する回復電圧に対して電流を遮断する能力が制限される。

HVDCで使用する場合、電流波形が正弦波ではない。限流抵抗と連動し、遮断操作ごとに主接点で非正弦波の回復電圧が生じる。この非正弦波は、急勾配のステップ波形に近い形になる。アーキ接触子の接点間の回復力には限界がある。回復電圧が回復力の限界を超えた場合、接点間が再点火する。

誘電性の回復が10kV/μsと非常に高速であるため、真空バルブは、従来型の油浸タイプのアーキ接触子よりも適切にこれらの義務を果たすことができる。

VACUTAP® VRは、切換電流と回復電圧間の位相変位を90度とする遮断テストにおいて、これらの義務に関する遮断容量が実証されている。テスト結果は表3のとおりである。

切換電流[A]	回復電圧[V]	切換回数	アーキ時間 [ミリ秒]
500	2'100	200	11未満
500	4'000	200	11未満
1'000	4'000	200	11未満
1'500	4'000	100	11未満
2'000	4'000	100	11未満

表3: VACUTAP® VRの切換耐久テストにおける接触磨耗

切換回数60万回の切換耐久テスト後と同様に、すべてのアーキ時間が前述の12秒未満である。

これらのテストから、切換パフォーマンスが見事に実証された。

3.2.3 機械的耐久テスト

機械的耐久テストの本来の目的は、ダイバータスイッチ、セレクタスイッチ、またはタップ選択器の機械寿命の実証である。表1の数値を採用する場合、関連するOLTCについて、最低120万回の機械操作を実証して保証しなければならない。したがって、VACUTAP® VRの機械的耐久テストにおける切換回数は、150万回(IEC 60214-1で要求されている回数の3倍)にまで達した。テスト中、故障や過度の磨耗は生じなかった。機械的耐久テストの開始時、終了時、およびいくつかの中間点における切換シーケンスの記録に著しい相違は見られなかった。また、それに相当するすべての切換時間は許容範囲内であった。図6は、切換回数150万回の機械的耐久テストの開始時と終了時における切換シーケンスの記録である。表4は、ダイバータスイッチが正しく機能するための切換時間を示している。

機械的耐久テストにおける切換は、すべて流動体温度80°Cで行われた。また、機械的耐久テストは、いくつかのテスト対象を用いて実施された。1つの標本について最大200万回の切換を行ったが、これはテストの合格基準ではない。

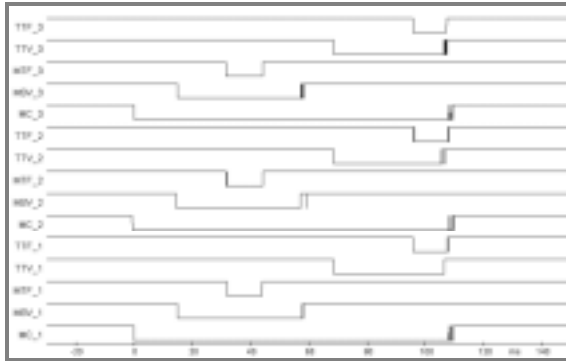


図6a: 機械的耐久テスト開始時のVACUTAP® VRダイバータスイッチの切換シーケンス(切換方向1→n+1)

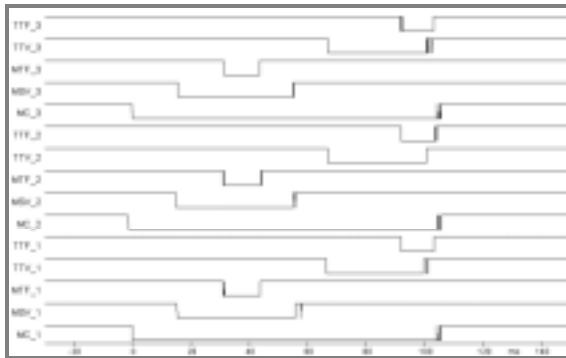


図6b: 機械的耐久テスト終了時のVACUTAP® VRダイバータスイッチの切換シーケンス(切換方向1→n+1)

油温度80℃		MSV開 - MSV閉	MSV閉 - TTV開	MSV開 - MTF開	TTV開 - TTF開
許容時間		47ミリ秒 未満	15ミリ秒 未満	13ミリ秒 超	13ミリ秒 超
テスト開始時の時間	#1	43.1ミリ秒	11.6ミリ秒	15.8ミリ秒	26.8ミリ秒
	#2	41.7ミリ秒	11.3ミリ秒	15.0ミリ秒	25.3ミリ秒
150万回の 切換動作 後の時間	#1	42.3ミリ秒	12.7ミリ秒	15.3ミリ秒	23.8ミリ秒
	#2	38.1ミリ秒	12.0ミリ秒	13.8ミリ秒	23.1ミリ秒

表4: 機械的耐久テストの開始時および終了時における2台のVACUTAP® VRダイバータスイッチの切換時間

切換回数を多くすることで、寿命に関して25%分の安全余裕を与えている。保守点検間隔とされる切換回数30万回については、テストではその5倍の切換動作を行った。真空バルブのペローズの機械寿命は非常に長いため、数百万回の切換を行う別の耐久テストを実施した。

		MSV開 - MSV閉	MSV閉 - TTV開	MSV開 - MTF開	TTV開 - TTF開
-25℃の許容時間		90ミリ秒 未満	20ミリ秒 未満	13ミリ秒 超	13ミリ秒 超
25℃の時間 (すべてのテストサンプル)		43ミリ秒 未満	11ミリ秒 未満	15ミリ秒 超	26ミリ秒 超
-25℃の時間	#1	52ミリ秒 未満	13ミリ秒 未満	19ミリ秒 超	35ミリ秒 超
	#2	44ミリ秒 未満	11ミリ秒 未満	17ミリ秒 超	29ミリ秒 超
	#3	46ミリ秒 未満	12ミリ秒 未満	18ミリ秒 超	30ミリ秒 超

表5: VACUTAP® VRダイバータスイッチの低温テストにおける切換時間

低温時機械切換能力は、-30℃まで136回の動作テストを実施して合格した。表5から、すべての切換動作が合格したことがわかる。

IEC要件に加えて、高温時機械切換能力についても、130℃で136回の動作テストを実施して実証された。一部のテスト対象については、切換回数1000回の高温度テストを実施した。

上記の温度条件、モータドライブの提供周波数60Hz、および倍速運転モータドライブを使用した場合の適切な接触時間も示すことができた。倍速条件は、タップ切換器が連続してすばやく動作しなければならない産業用変圧器で必要になる場合がある。

これらのテストにより、VACUTAP® VRの機械パフォーマンスが実証された。

3.2.4 絶縁液体

2.1で述べたOLTCの真空スイッチ技術の利点により、代替絶縁液体を容易に使用できるようになった。そこで、従来型の絶縁油のほかに、さまざまな絶縁液体の中でVACU-TAP® VRのテストを実施した。以下の絶縁液体群のうちそれぞれ1種類を用いて、機械的耐久テストおよび誘電テストを実施した。

- 高分子量炭化水素
- 合成エステル
- 天然エステル

低温粘度が異なるため、液体ごとに低温限界を調節する必要がある(通常、低温限界が上昇する)。代替液体の誘電抵抗値は、絶縁油と同様、電界の均一性に応じて異なるが、絶縁油との機械的耐久性の比較は可能である。

3.2.5 IEC 60214-1に基づいたテスト

型式テストとして国際規格IEC 60214-1で要求されているいくつかのテストを実施することにより、上記のテストを完了した。

それ以外のパフォーマンス特性(接触子の温度上昇、短絡電流テスト、遷移インピーダンステスト、誘電テスト)についても、規格で要求されている条件の下で、複数のテスト対象を用いて実証され、それらすべてのテストで合格が確認された。

4 結論

真空スイッチ技術により、変圧器の推定寿命に見合うOLTCの製造が可能になり、時間的制約を受けない切戻回数30万回という保守点検間隔が実現された。

この推定寿命および保守点検間隔は特別なテスト方法で実証された。実施したテストは、国際規格IEC 60214-1の標準的なテスト要件を上回っている。特に、切戻性能、接触磨耗、および機械性能は、寿命と保守点検について実証する上では重要な課題である。VACU-TAP[®] VRは、いくつかの耐久テストにおいてその性能が実証され、すべての国際要件を満たしている。したがって、このOLTCについては、切戻回数30万回の保守点検間隔、60万回の真空バルブ接触子寿命、120万回のダイバータスイッチ寿命を前提とする運用が実証されている。しかし、依然としてOLTCは機械式切戻装置として分類する必要があり、機械部品に傷や磨耗がまったく生じないわけではない。

参考文献

- 1/ A. Krämer、『On-Load Tap-Changer for Power Transformers – Operation Principles, Applications and Selection』、MR Publication、2000年、ISBN 3-00-005948-2
- 2/ L.L. Grigsby、『The Electric Power Engineering Handbook』、CRC Press LLC、

2001年、3-184~3-204ページ、ISBN 0-8493-8578-4

- 3/ D. Dohnal, B. Kurth、『Vacuum Switching, a Well Proven Technology has Found its Way into Resistance-type Load Tap Changers』、Proceedings IEEE Transmission and Distribution Conference、2001年
- 4/ D. Dohnal, A. Krämer、『Vacuum Switching Technology in On-load Tap-changers Becomes State of the Art for Regulating Transformers』、The 14th Conference of the Electric Power Supply Industry (CEPSI 2002)、2002年11月5~8日(日本: 福岡)、Paper T2-A-1
- 5/ K. Roider, A. Krämer、『Ageing of On-load Tap-changer Oil under Consideration of Tap-changer Technology, Application and Operating Conditions』、The 15th Conference of the Electric Power Supply Industry (CEPSI 2004)、2004年10月18~22日(China: Shanghai)、ID 152
- 6/ IEC 60214-1 『Tap-changers – Part 1: Performance Requirements and Tests』、Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale、2003年
- 7/ D. Dohnal, A. Kraemer, D. Shen、『HVDC-applications significantly improved by the use of the new generation of on-load tap-changers with vacuum switching technology』、The 16th Conference of the Electric Power Supply Industry、2006年11月6~10日(India: Mumbai)

著者の住所

Dr. Axel Krämer
c/o Maschinenfabrik Reinhausen GmbH
テスト部門マネージャ
Falkensteinstrasse 8
93059 Regensburg
Tel.: +49 (0) 941 / 4090-486
Fax: +49 (0) 941 / 4090-114
a.kraemer@reinhausen.com

Dr. Dieter Dohnal
c/o Maschinenfabrik Reinhausen GmbH
エンジニアリングおよび研究開発部門ディレクタ
Falkensteinstrasse 8
93059 Regensburg
Tel.: +49 (0) 941 / 4090-345
Fax: +49 (0) 941 / 4090-506
d.dohnal@reinhausen.com