3DIM

2010年2月5日

機械状態監視診断技術（振動）交流会

誘導電動機の電流徴候解析

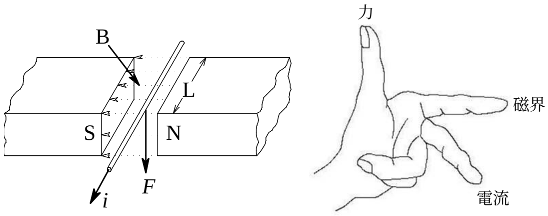
小 村 英 智

3DIM技研

3DIM

フレミングの法則

$$F[N]=B[T]\cdot L[m]\cdot I[A]$$

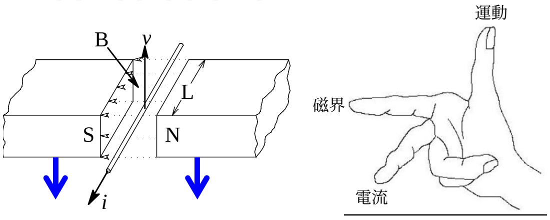


フレミングの左手の法則

3DIM

フレミングの法則

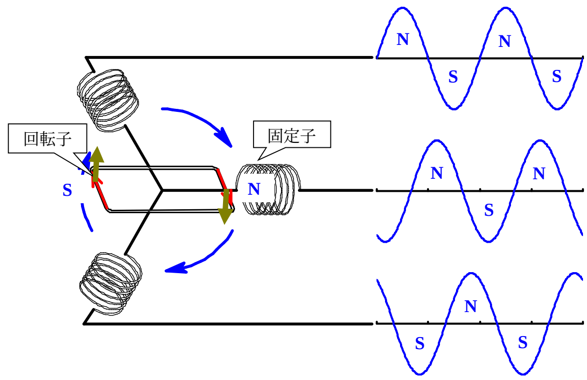
$$e[V]=B[T]\cdot L[m]\cdot v[m/s]$$



フレミングの右手の法則

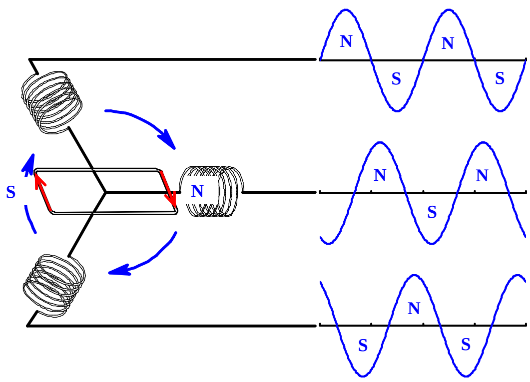
3DIM

三相交流による回転磁界



3DIM

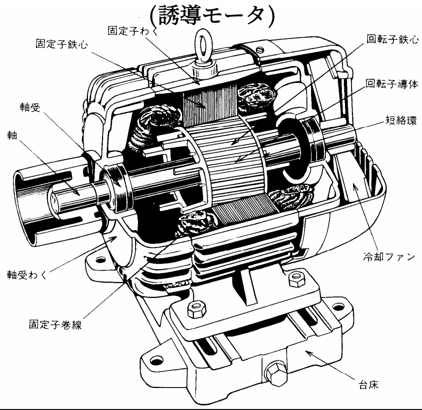
三相交流による回転磁界



3DIM

電動機の構造

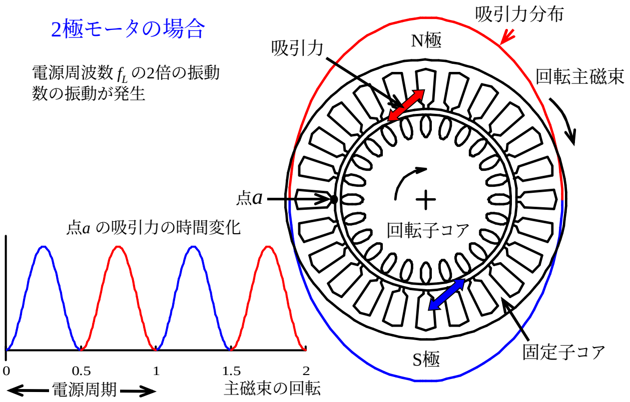
(誘導モータ)

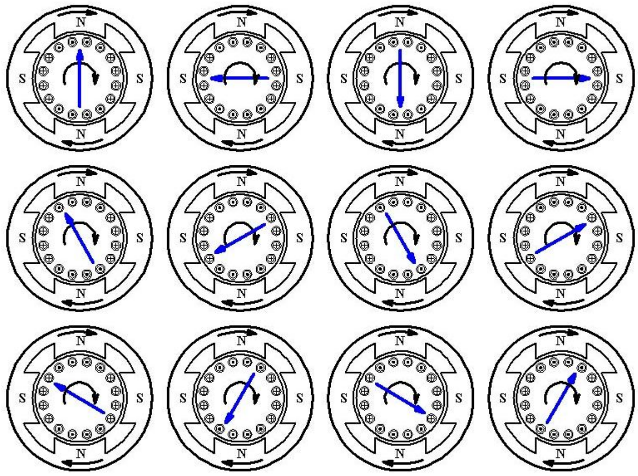


誘導電動機の振動

2極モータの場合

電源周波数 f_L の2倍の振動数の振動が発生

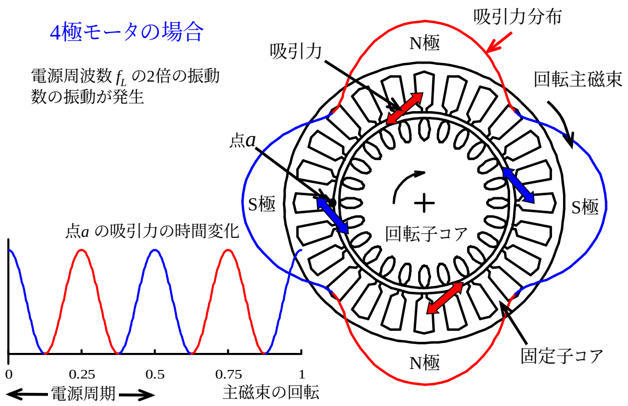




誘導電動機の振動

4極モータの場合

電源周波数 f_L の2倍の振動数の振動が発生



誘導電動機の回転数

同期速度N_xは　$N_x = 120\frac{f_L}{p}$ rpm　　$f_x = \frac{2}{p} f_L$ Hz

実際の回転数Nと同期速度N_xに差があり，その関係は

$$s = \frac{N_x - N}{N_x}$$

ここで s はすべり率であり N は,　$N = N_x(1-s)$

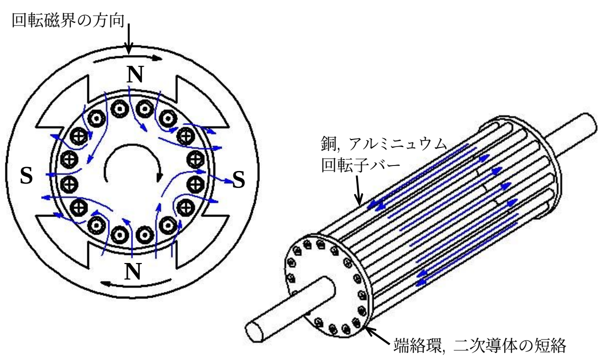
$$N = 120\times(1-s)\frac{f_L}{p}$$

すべり周波数(slip frequency) s_f は,

$$s_f = \frac{1}{60}(N_x - N) = s\times\frac{2}{p} f_L$$

f_L : 電源周波数
p : 磁極数
s : すべり率

4極の誘導電動機



磁気振動(電気的振動)

空隙不平衡による振動

電源周波数の2倍:　$2f$（$2f_r$と$2f_L$のうなり発生）

軸曲り/回転子偏心:　$2f_L$,　f_rが$2sf_L$で振幅変調, ミスアライメントなどで$2f_r$があると$2f_r$が$2sf_L$で振幅変調

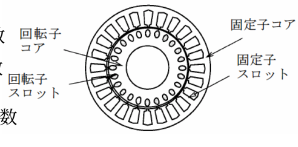
固定子巻線の不平衡 → 電源周波数の2倍:　$2f_L$

回転子巻線の不平衡 → f_rが$2sf_L$で振幅変調

電源電圧の不平衡 → 電源周波数の2倍:　$2f_L$

空隙高調波磁束 → 回転子スロット数 / 固定子スロット数

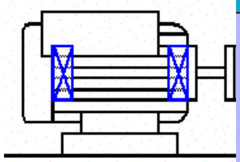
インバータの不具合 → キャリア周波数



誘導電動機の異常

異常	スペクトル，時間波形	対策 / 備考
空隙不均衡振動 Air-gap vibration （静的偏心）	$2f_L$ 成分プラス側帯波， $2f_r$ 成分と $2f_L$ でうなり． f_L：電源周波数 f_r：回転周波数	フレームの変形を戻し電機子を中心に置く．軸受の過大隙間をなくして，どんな状態でも回転子が固定子の中心を外さないようにする．
回転子バーの折損	f_r 成分と（極数×滑り周波数 s_f）の側帯波	緩んだか折損した回転子バーを交換する．
回転子の偏心 （動的偏心）	f_r 成分，$2f_r$ 成分と $2f_L$ でうなりの可能性がある．	空隙振動が起こるかも知れない．
柔軟固定子	$2f_r$ 成分と $2f_L$ でうなり．	固定子の構造を硬くする．
回転磁界中心外れ	軸方向に影響あり	原因がスラスト方向の軸の制約条件や継手に在るかも知れない．その原因を除去する．
固定子巻線短絡	$2f_L$ と高調波成分	固定子の交換

誘導電動機の振動速度スペクトルの例

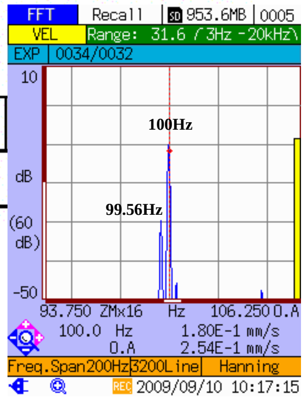


18.5 kW,

2988 rpm / 60 s = 49.8 c/s

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{3000-2988}{3000} = 0.004$$

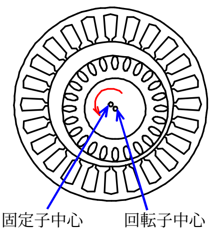
$$s_f = \frac{3000-2988}{60} = 0.2Hz$$



3DIM

◆ 電動機において，回転子中心が固定子中心と一致せずにエアギャップに不均一が生じた場合，どのような周波数の振動が主に発生するか．

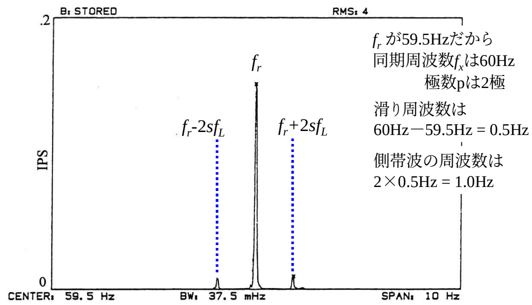
- ☐ 電源周波数(f_L)
- ☑ 電源周波数の2倍($2f_L$)
- ☐ 回転周波数(f_r)
- ☐ 回転周波数の2倍($2f_r$)
- ☐ すべり周波数の2倍($2f_s$)



3DIM

回転子バー折損の例

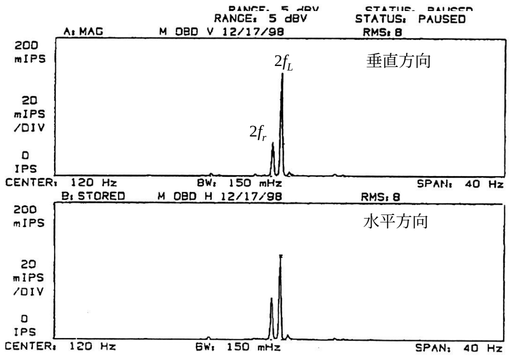
f_r 成分と（極数p×滑り周波数s_f）の側帯波



3DIM

空隙不均衡振動(静的偏心)の例

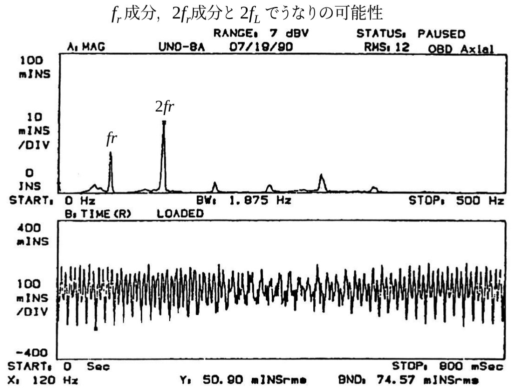
電源周波数の2倍：$2f_L$，$2f_r$ と $2f_L$ でうなり



3DIM

回転子偏心(動的偏心)の例

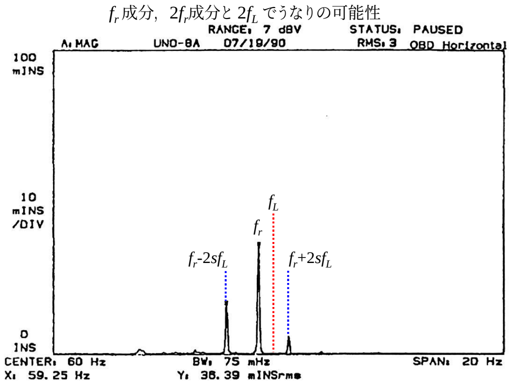
f_r成分，$2f_r$成分と $2f_L$ でうなりの可能性がある



3DIM

回転子偏心(動的偏心)の例

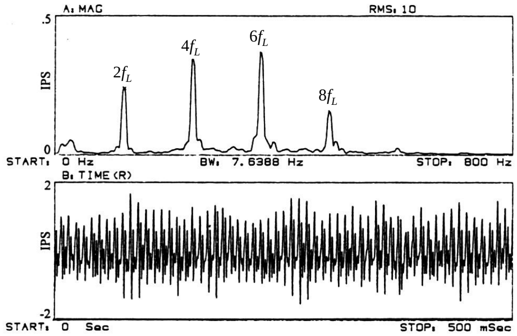
f_r成分，$2f_r$成分と $2f_L$ でうなりの可能性



3DIM

固定子巻線短絡の例

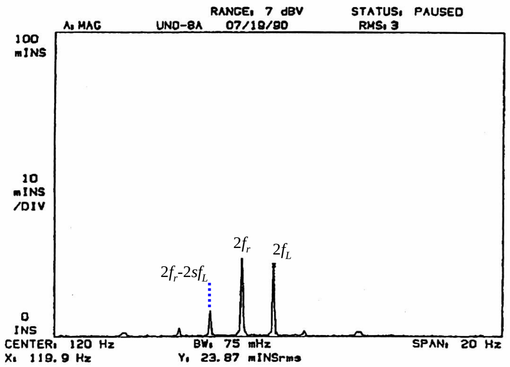
$2f_L$ 成分とその高調波成分



3DIM

回転子偏心(動的偏心)の例

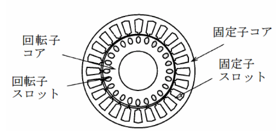
f_r成分，$2f_r$成分と $2f_L$ でうなりの可能性



3DIM

◆ 回転子が1800rpmの三相モータにおいて，固定子のスロット数が35本，回転子のスロット数が23本である．固定子のスロットが1本出っ張った．モータ外側にて計測される振動数はいくらか．

$$f=\frac{1800}{60}\times 23=690\ \text{Hz}$$

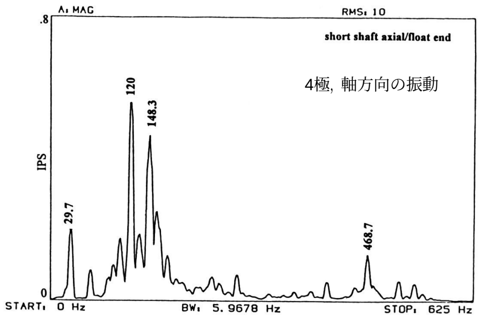


◆ 回転子が1800rpmの三相モータにおいて，固定子のスロット数が33本，回転子のスロット数が21本である．回転子のスロットが1本出っ張った．このとき，軸振動に生じる振動数はいくらか．

$$f=\frac{1800}{60}\times 33=990\ \text{Hz}$$

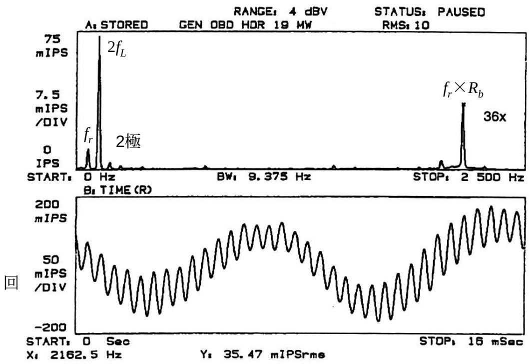
3DIM

回転子偏心(動的偏心)の例



3DIM

回転子バー通過振動の例



3DIM

誘導電動機電流徴候解析
MCSA : Motor Current Signature Analysis

3DIM

MCSAとは何か

1970年　米国原子力規制委員会

炉に入らないで原子炉内の電動機をチェックする技術を必要としていた.

米国テネシー州のオークリッジ国立研究所で研究が開始された.

電動機の中の様々な異常状態で電動機の電流が変調されることを発見.

固定子と回転子間のエア･ギャップの変化や回転子バーの抵抗変化，あるいは回転子の回転変動，トルク変動などが，空間磁束線に影響を与え，逆起電力を通して固定子に流れる電流に反映しているという理論に基づいている.

1985年頃から実用化.

回転子バーの破損

静的偏心／動的偏心

鉄心の破損

巻線のゆるみ／短絡

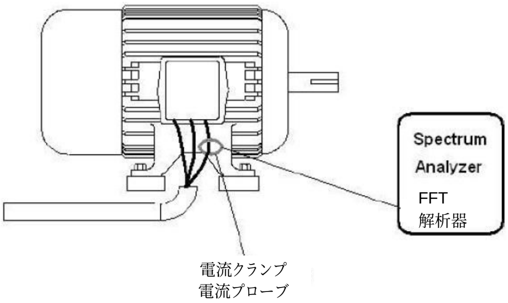
ミスアライメント／アンバランス

基盤ゆるみ

軸受の欠陥

3DIM

誘導電動機電流徴候解析
MCSA : Motor Current Signature Analysis



3DIM

電源品質に関する制約

･電圧の偏差　：　銘版の電圧V_{np}に対する差

$$\frac{1}{3}(V_a+V_b+V_c)=V_{ave} \qquad \frac{V_{ave}-V_{np}}{V_{ave}}\times 100\% \le \pm 5.0\%$$

許容範囲　5%

･電圧の不平衡　：　電流が不平衡となり，巻線の過熱原因

$$\frac{\max\{|V_a-V_{ave}|,|V_b-V_{ave}|,|V_c-V_{ave}|\}}{V_{ave}}\times 100\% \le \pm 2.0\%$$

許容範囲　2%

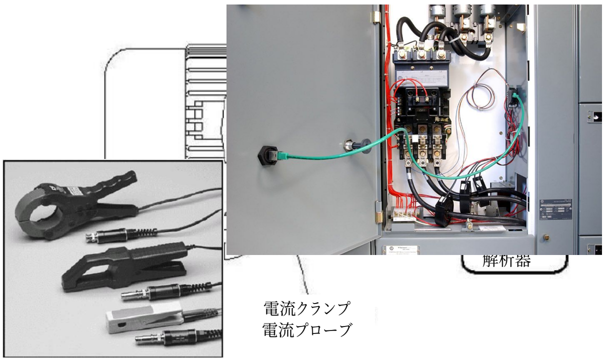
･IEEE519 規格のTDH(総合高調波歪)の推奨値　　力率　　0.85以上

電圧高調波高調波歪　：　5%以内

電流高調波高調波歪　：　3%以内

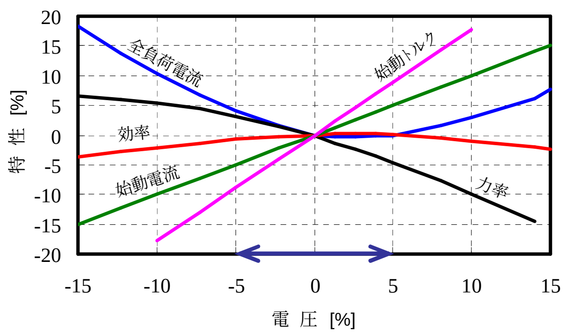
3DIM

誘導電動機電流徴候解析
MCSA : Motor Current Signature Analysis



3DIM

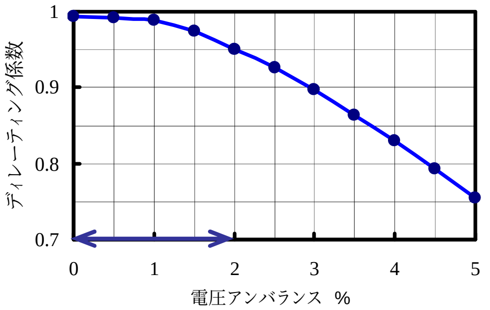
電源電圧の偏移による電動機への影響



3DIM

ディレーティング係数

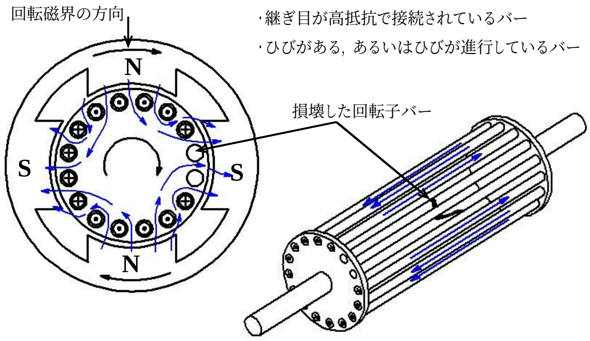
バランスが悪いと，誘導電動機の最大許容
電力あるいは負荷が低下することになる．



3DIM

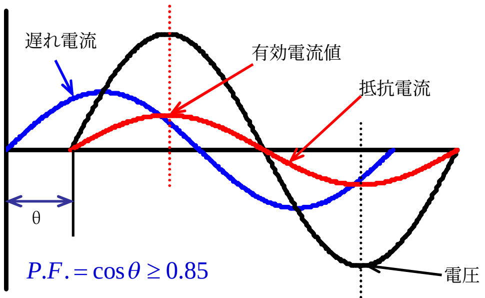
回転子バーの破損

・継ぎ目が高抵抗で接続されているバー
・ひびがある，あるいはひびが進行しているバー



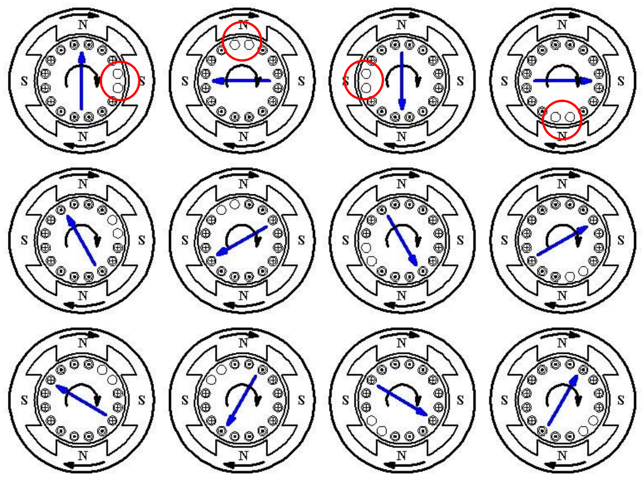
3DIM

電力要素と力率



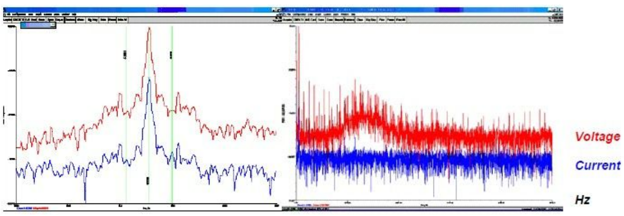
$$P.F. = \cos\theta \geq 0.85$$

$$\theta \leq 0.5rad$$



3DIM

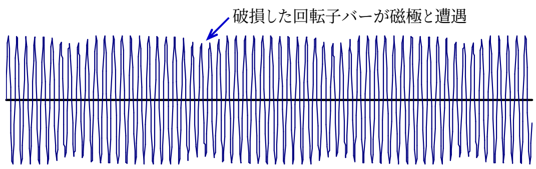
正常な電動機のスペクトル例



低い周波数領域 (0 － 100Hz)　　高い周波数領域 (0 – 5,000Hz)

3DIM

回転子バー破損の例



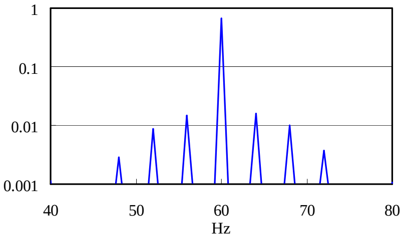
極通過周波数 f_{PP} (Pole pass frequency)

$$f_{PP} = (f_X - f_R) \times P = (30 - 29.33) \times 4 = 2.68Hz$$

$$f_{PP} = \left(\frac{2f_L}{P} - 2(1-s)\frac{f_L}{P}\right) \times P = 2s \times f_L = 2 \times 0.022 \times 60 = 2.68Hz$$

3DIM

回転子バー破損の例



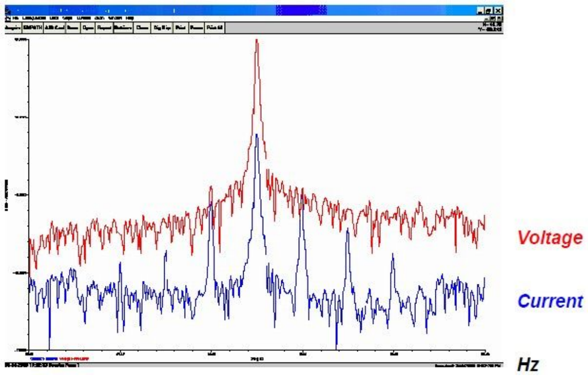
極通過周波数 f_{PP} (Pole pass frequency)

$$f_{PP} = (f_X - f_R)\times P = (30 - 29.33)\times 4 = 2.68Hz$$

$$f_{PP} = \left(\frac{2f_L}{P} - 2(1-s)\frac{f_L}{P}\right)\times P = 2s\times f_L = 2\times 0.022\times 60 = 2.68Hz$$

3DIM

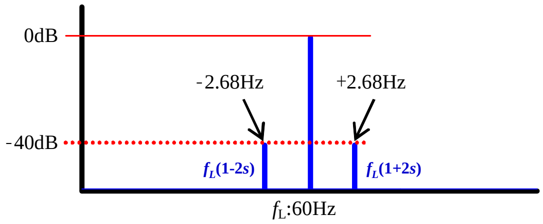
回転子バー破損の例



出典:Areva社HP

3DIM

回転子バー破損の例



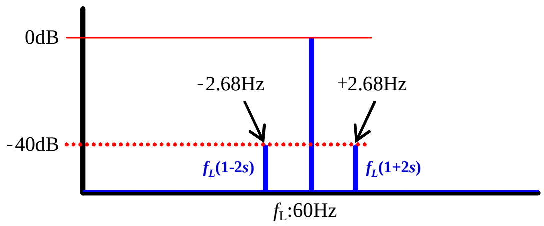
極通過周波数 f_{PP} (Pole pass frequency)

$$f_{PP} = (f_X - f_R)\times P = (30 - 29.33)\times 4 = 2.68Hz$$

$$f_{PP} = \left(\frac{2f_L}{P} - 2(1-s)\frac{f_L}{P}\right)\times P = 2s\times f_L = 2\times 0.022\times 60 = 2.68Hz$$

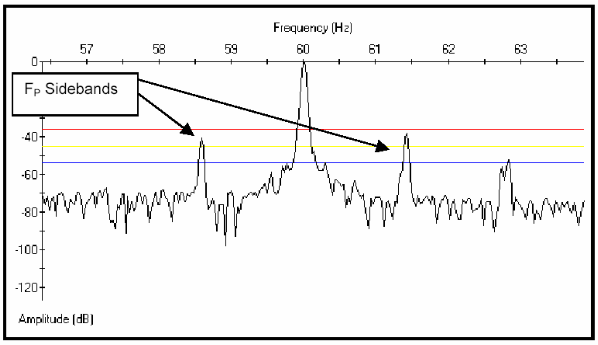
3DIM

回転子バー破損程度の評価



3DIM

回転子バー破損の例



出典:PdMA社HP

3DIM

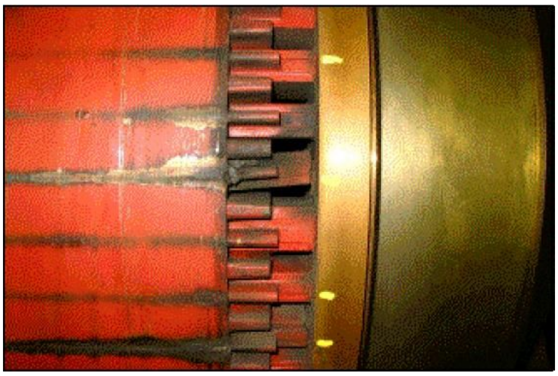
回転子バー破損程度の評価

回転子バー損傷程度レベル表

程度レベル	f_P/f_L (dB)	回転子の状態評価	推奨する行動
1	>60	最良な状態	なし
2	54-60	良好な状態	なし
3	48-54	穏やかな状態	データの傾向管理
4	42-48	回転子バーに割れが進展している，あるいは高い抵抗で接続して状態	監視間隔を短縮，試験周波数の増加傾向を監視
5	36-42	1つか2つの回転子バーが割れか折損がある状態	電源と損傷程度を検証するために振動測定を行う
6	30-36	複数の回転子バーが割れか折損がある状態	できる限り速やかに分解点検
7	<30	複数の回転子バーが割れか折損，あるいは短絡板が破損している状態	できる限り速やかに分解点検あるいは交換

3DIM

回転子バー破損例



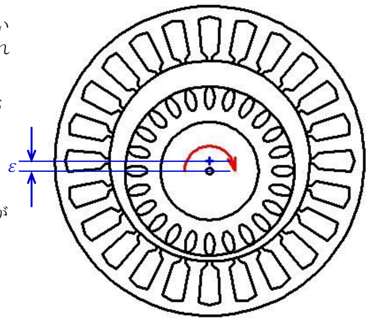
3DIM

回転子の静的偏心

・電動機あるいは従機が柔らかい脚あるいは基礎に備え付けられた場合

・転がり軸受にミスアライメントがある場合

・すべり軸受けのギャップ調整が不適切な場合



3DIM

回転子バー破損例

3DIM

回転子の静的偏心

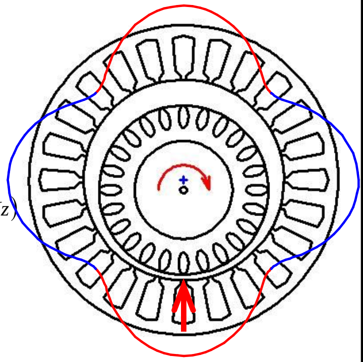
回転子バーの数 n_B：47本

回転周波数 f_R：29.33 Hz

↑ 箇所を1秒間に通過する転子バーの数 f_C：は,

$$f_C = n_B \times f_R \quad (Hz)$$

$$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \quad (Hz)$$



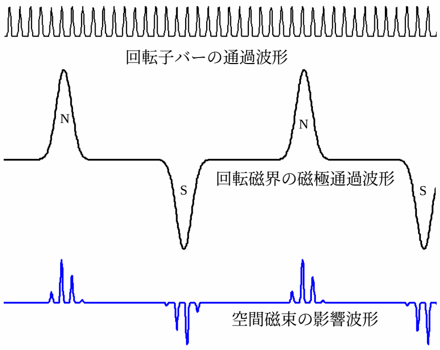
3DIM

回転子バー破損例

ロータバー57本中　7本折損

3DIM

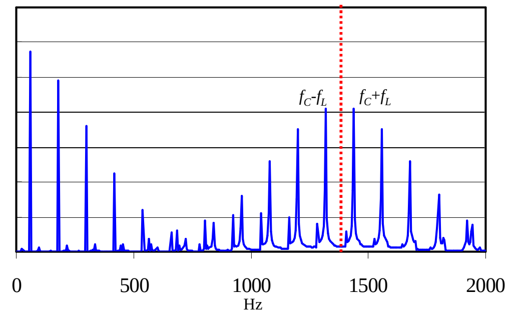
回転子の静的偏心



3DIM

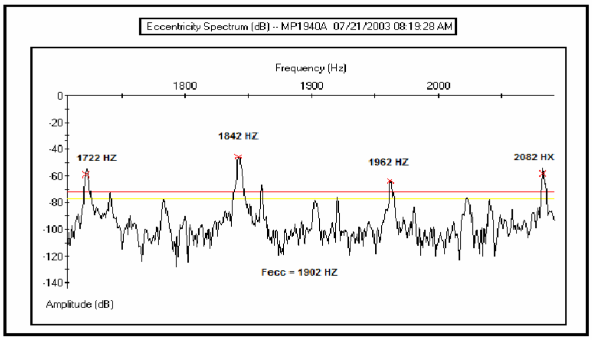
回転子の静的偏心

$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \ (Hz)$



3DIM

回転子の静的偏心



出典:PdMA社HP

3DIM

回転子の静的偏心

$f_C = n_B \times f_R \ (Hz)$

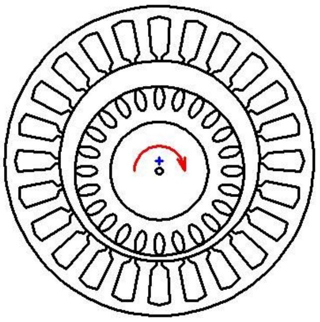
回転子バーの数 n_B：47本

回転周波数 f_R：29.33 Hz

$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \ (Hz)$

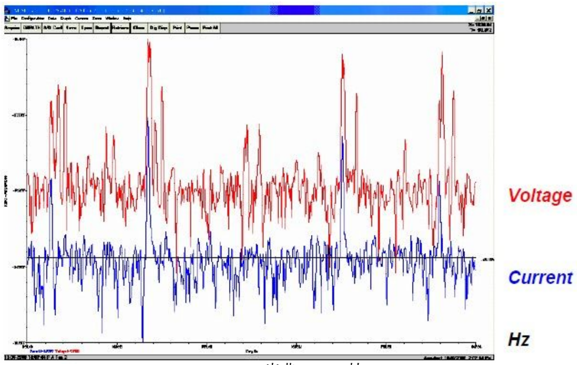
$f_{SE} = n_B \times f_R \pm n \times f_L \ (Hz)$

n：奇数の整数



3DIM

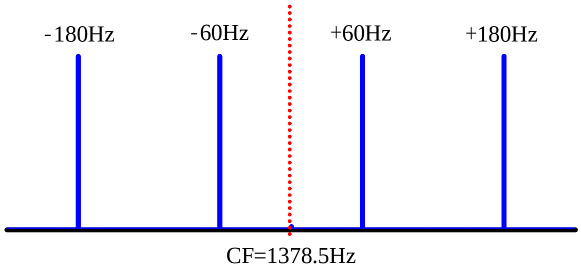
回転子の静的偏心



出典:Areva社HP

3DIM

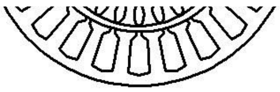
回転子の静的偏心



$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \ (Hz)$

$f_{SE} = n_B \times f_R \pm n \times f_L \ (Hz)$

n：奇数の整数



3DIM

回転子の動的偏心

$f_C = n_B \times f_R \ (Hz)$

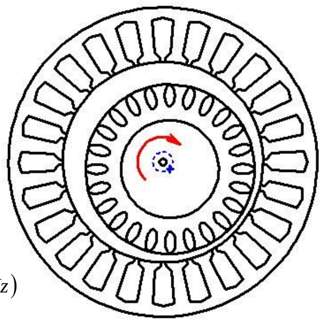
回転子バーの数 n_B：47本

回転周波数 f_R：29.33 Hz

$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \ (Hz)$

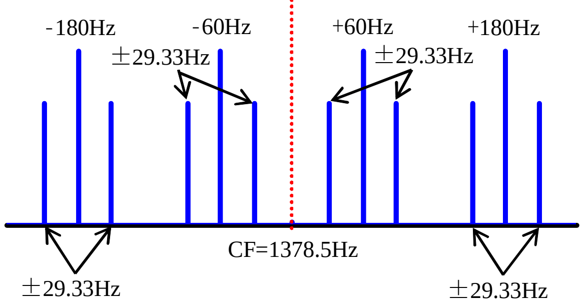
$f_{DE} = n_B \times f_R \pm n \times f_L \pm f_R \ (Hz)$

n：奇数の整数



3DIM

回転子の動的偏心

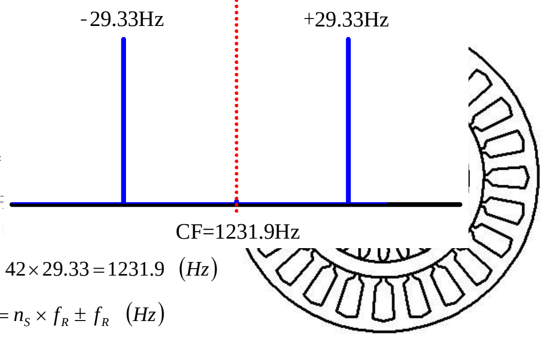


$f_{DE} = n_B \times f_R \pm n \times f_L \pm f_R \quad (Hz)$

n：奇数の整数

3DIM

固定子の解析



$f_C =$

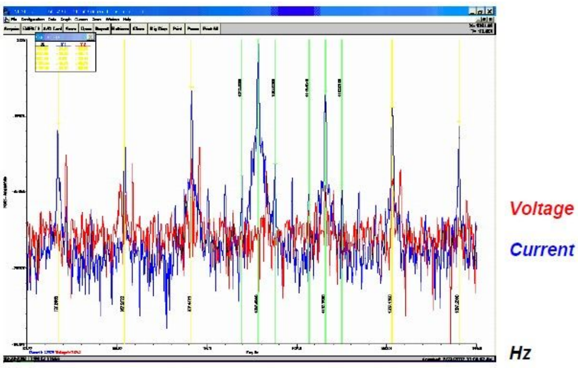
固定

$f_C = 42 \times 29.33 = 1231.9 \quad (Hz)$

$f_{SP} = n_S \times f_R \pm f_R \quad (Hz)$

3DIM

回転子の動的偏心

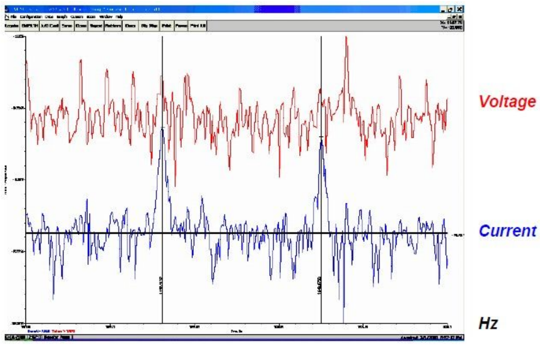


出典：Areva社HP

3DIM

固定子の解析

積層コアに損傷がある電動機の例



出典：Areva社HP

3DIM

固定子の解析

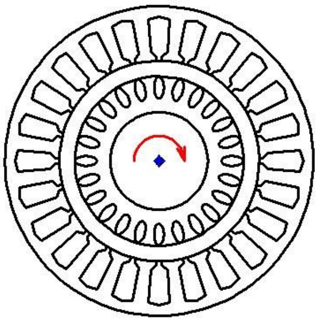
$f_C = n_S \times f_R \quad (Hz)$

固定子のスロットル数 n_S：42個

回転周波数 f_R：29.33 Hz

$f_C = 42 \times 29.33 = 1231.9 \quad (Hz)$

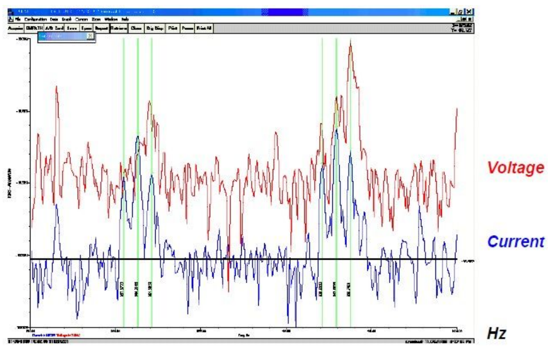
$f_{SP} = n_S \times f_R \pm f_R \quad (Hz)$



3DIM

固定子の解析

巻線間絶縁が劣化した電動機の例



出典：Areva社HP

3DIM

機械的解析（不つり合い）

電動機および電動機が駆動する機械に不つり合いがあると，動的偏心と同様な動作となる．

$f_C = n_B \times f_R \quad (Hz)$

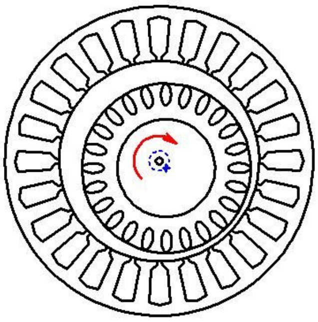
回転子バーの数 n_B：47本

回転周波数 f_R：29.33 Hz

$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \quad (Hz)$

$f_{DE} = n_B \times f_R \pm f_L \quad (Hz)$

$+4 \times f_L + 2 \times f_L \quad (Hz)$



3DIM

機械的解析（転がり軸受）

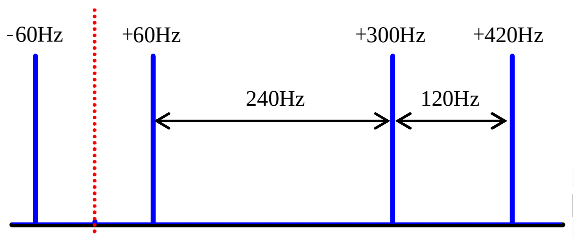
	軸受乗数	×1	×2	×3	×4
BPIR	4.395Hz	4.395×29.33×1 = 128.9	257.8	386.7	515.6
BPOR	2.606Hz	2.606×29.33×1 = 76.43	152.9	229.3	305.7
FTF	0.372Hz	0.372×29.33×1 = 10.91	21.81	32.73	43.64
BSF	1.830Hz	1.830×29.33×1 = 53.67	107.3	161.0	214.7

NTN6305 軸受周波数

$f_{BD} = BPIR \times f_R \times n \pm f_L \quad (Hz)$　　n：整数

3DIM

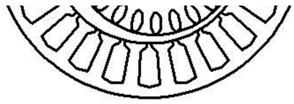
機械的解析（不つり合い）



$f_C = 47 \times 29.33 = 1378.5 \quad (Hz)$

$f_{DE} = n_B \times f_R \pm f_L \quad (Hz)$

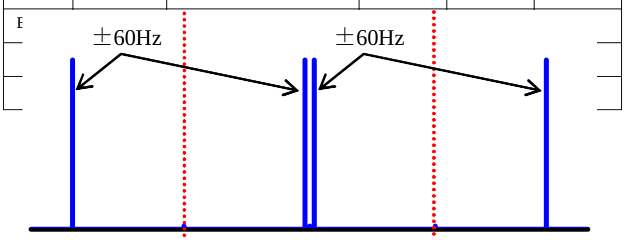
$+4 \times f_L + 2 \times f_L \quad (Hz)$



3DIM

機械的解析（転がり軸受）

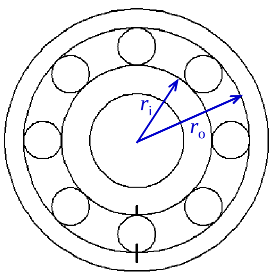
	軸受乗数	×1	×2	×3	×4
BPIR	4.395Hz	4.395×29.33×1 = 128.9	257.8	386.7	515.6



$f_{BD} = BPIR \times f_R \times n \pm f_L \quad (Hz)$　　n：整数

3DIM

機械的解析（転がり軸受）



NTN6305
の軸受乗数

$$BPIR = \frac{1}{1+k} \times N = 4.395 \quad Hz$$

$$BPOR = \frac{k}{1+k} \times N = 2.606 \quad Hz$$

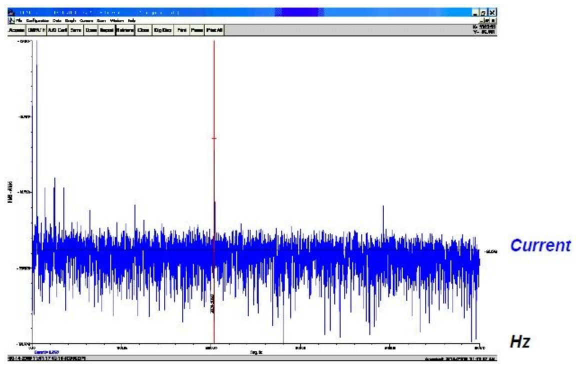
$$FTF = \frac{k}{1+k} = 0.372 \quad Hz$$

$$BSF = \frac{2k}{1-k^2} = 1.830 \quad Hz$$

$$k = \frac{r_i}{r_o} = \frac{BPOR}{BPIR}$$

3DIM

機械的解析（転がり軸受）

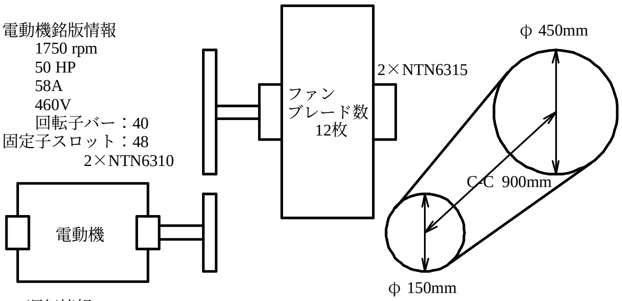


出典：Areva社HP

3DIM

送風機装置の解析

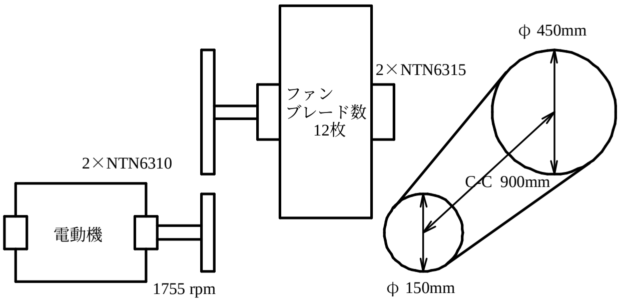
電動機銘版情報
1750 rpm
50 HP
58A
460V
回転子バー：40
固定子スロット：48



運転情報
1755 rpm
57A, 59A, 56A
464V, 470V, 466V

3DIM

送風機装置の解析



$$f_F = \frac{1755rpm}{60s} \times \frac{150\phi}{450\phi} = 29.25 \times \frac{1}{3} = 9.75 \quad (rps)$$

3DIM

電源品質

電動機銘版情報
58A
460V

運転情報
57A, 59A, 56A
464V, 470V, 466V

電圧不つり合い

$$\frac{1}{3}(464V_a + 470V_b + 466V_c) = 467V_{ave}$$

$$\frac{467V_{ave} - 464V_a}{467V_{ave}} \times 100\% = 0.6\%$$

許容範囲 2% 以内

電圧偏差

$$\frac{467V_{ave} - 460V_{np}}{467V_{ave}} \times 100\% = 1.5\%$$

許容範囲 5% 以内

IEEE519 規格のTDH(総合高調波歪)の推奨値 力率 0.85以上

電圧高調波歪 5%以内

電流高調波歪 3%以内

3DIM

転がり軸受乗数

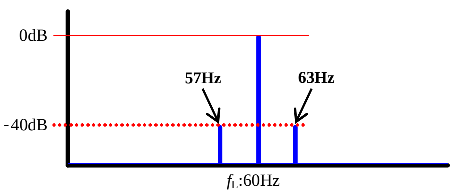
	軸受NTN6310		軸受NTN6315	
	乗数	×1基本高調波(CF)	乗数	×1基本高調波(CF)
BPIR	4.929	4.929×29.25×1=144	4.919	4.919×9.75×1=47.96
BPOR	3.071	3.071×29.25×1=89.8	3.081	3.071×9.75×1=30.0
FTF	0.384	0.384×29.25×1=11.23	0.385	0.385×9.75×1=3.75
2×BSF	2.036	2.036×29.25×1=59.55	2.062	2.062×9.75×1=20.1

3DIM

回転子バーの診断

運転情報
1755 rpm

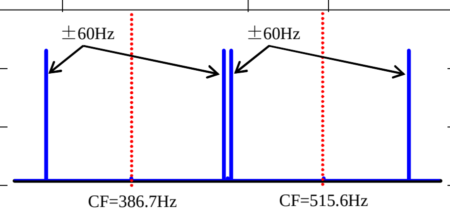
$$f_{PP} = 2s \times f_L = 2 \times \frac{1800 - 1755}{1800} \times 60 = 3Hz$$



3DIM

転がり軸受乗数

	軸受NTN6310		軸受NTN6315	
	乗数	×1基本高調波(CF)	乗数	×1基本高調波(CF)
BPIR	4.929	4.929×29.25×1=144	4.919	4.919×9.75×1=47.96
BPOR				1=30.0
FTF				1=3.75
2×BSF				1=20.1

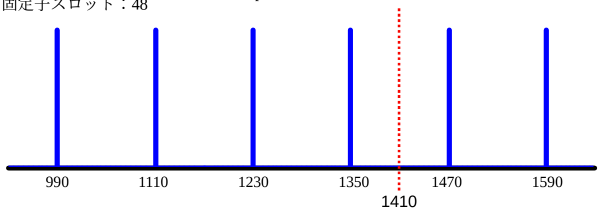


3DIM

スペクトルの診断

電動機銘版情報
回転子バー：40
固定子スロット：48

運転情報
1755 rpm

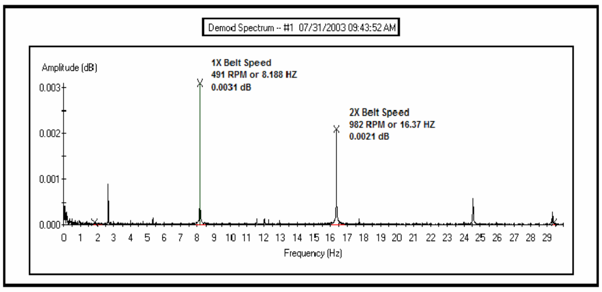


固定子の中心周波数　$f_C = n_S \times f_R = 48 \times 29.25 = 1404$ (Hz) ±29.25

3DIM

機械的解析（ベルト）

ベルト心出し前の電流復調スペクトル



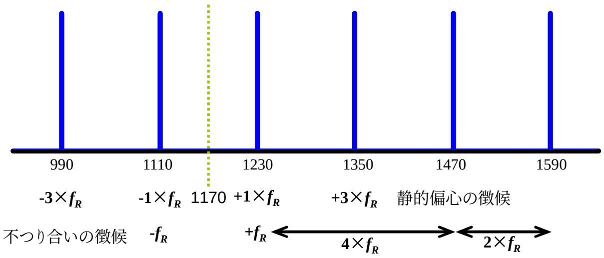
出典：PdMA社HP

3DIM

スペクトルの診断

電動機銘版情報
回転子バー：40
固定子スロット：48

運転情報
1755 rpm

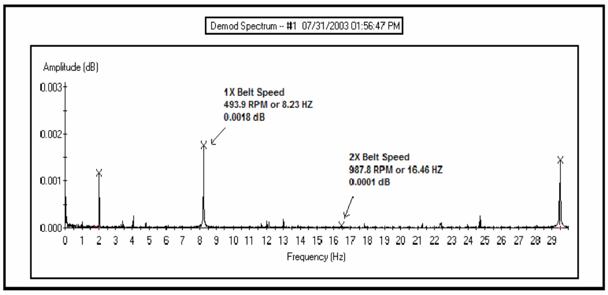


回転子の中心周波数　$f_C = n_B \times f_R = 40 \times 29.25 = 1170$ (Hz) ±60

3DIM

機械的解析（ベルト）

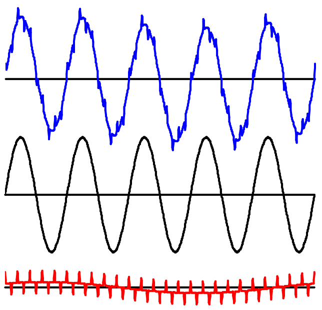
ベルト心出し後の電流復調スペクトル



出典：PdMA社HP

3DIM

前処理の例

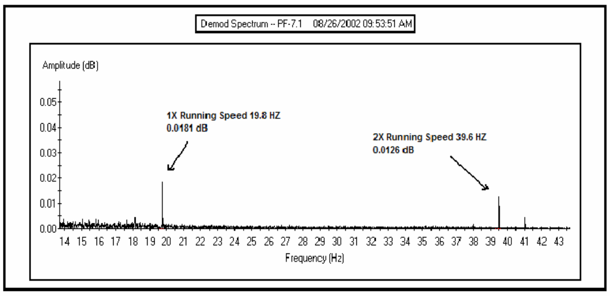


残った信号を包絡線処理をするために，電源周波数成分を取り除く必要がある．

3DIM

機械的解析（ポンプ）

心出し前の電流復調スペクトル

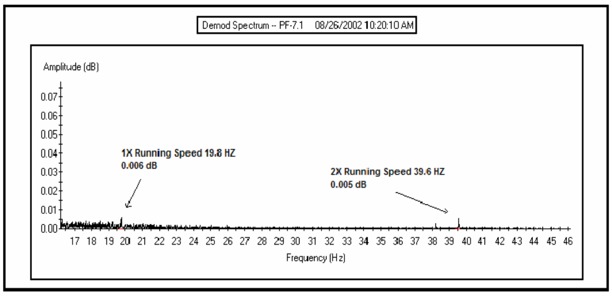


出典：PdMA社HP

3DIM

機械的解析（ポンプ）

心出し後の電流復調スペクトル

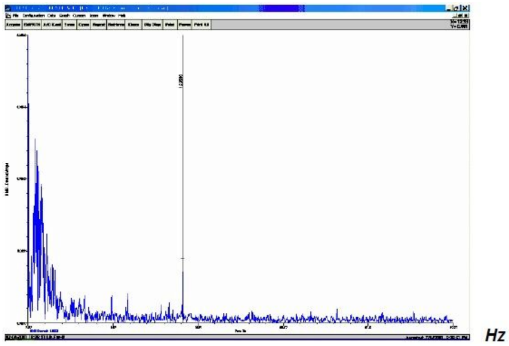


出典：PdMA社HP

3DIM

機械的解析（心出し）

心出しされた電動機のRMS復調スペクトル

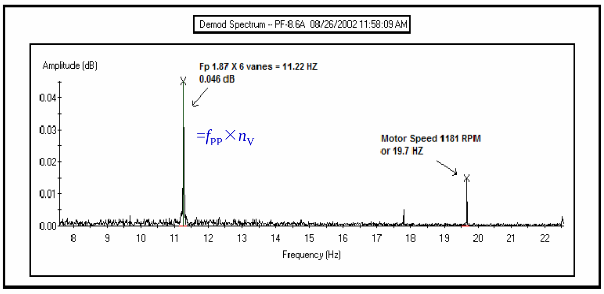


出典：Areva社HP

3DIM

機械的解析（ポンプ）

インペラー損傷のポンプの電流復調スペクトル

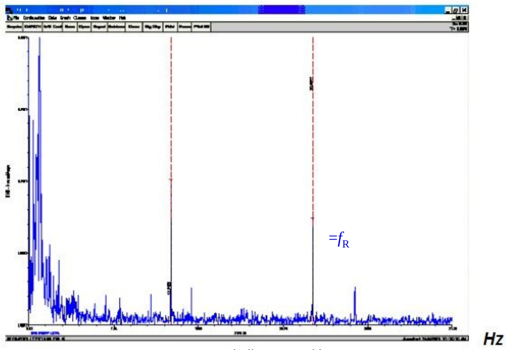


出典：PdMA社HP

3DIM

機械的解析（心出し）

心出し不良の電動機のRMS復調スペクトル

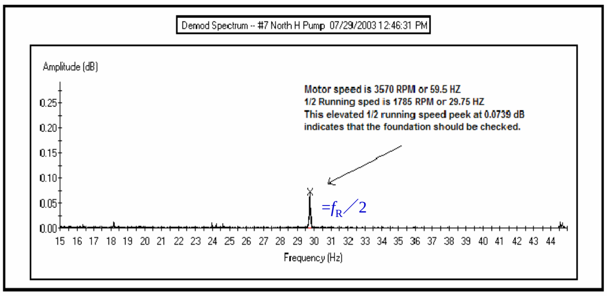


出典：Areva社HP

3DIM

機械的解析（ポンプ）

軟い基礎の電動機とポンプの電流復調スペクトル

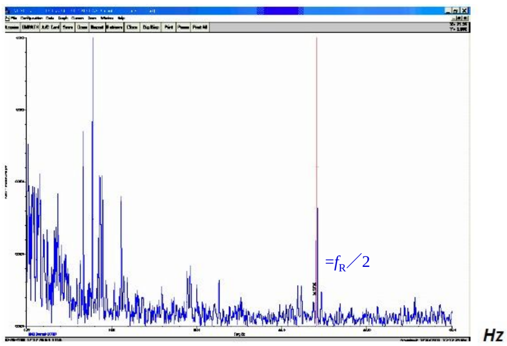


出典：PdMA社HP

3DIM

機械的解析（ゆるみ）

基礎にゆるみがある電動機のRMS復調スペクトル

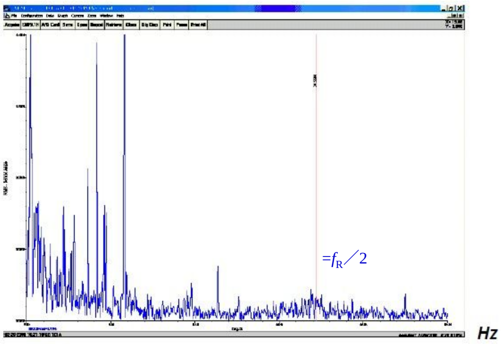


出典：Areva社HP

3DIM

機械的解析（ゆるみ）

基礎が強化された後の同じ電動機のRMS復調スペクトル



出典：Areva社HP

3DIM

固定子の異常

巻線のゆるみ	巻線の短絡	鉄心の破損
↓	↓	↓
機械的にコイルの絶縁損傷	コイルの過度の加熱	局所的な渦電流を発生
↓	↓	↓
コロナ放電を起こし絶縁材を分解	電流不均衡	渦電流で鉄心を局所的加熱
	↓	↓
	出力低下	固定子の積層鉄心が短絡状態に変化
	↓	
	接地事故	

お願い

3DIM

固定子の異常

巻線のゆるみ	巻線の短絡	鉄心の破損
↓	↓	↓

カゴ（回転子）の非対象性の検出は固定子の電流解析を使うことで可能である.

固定子の電流 / 電圧解析を使って巻線欠陥を検出することは困難である.

	出力低下	固定子の積層鉄心が短絡状態に変化
	↓	
	接地事故	

3DIM

ISO/TC108/SC5 「機械の状態監視と診断」

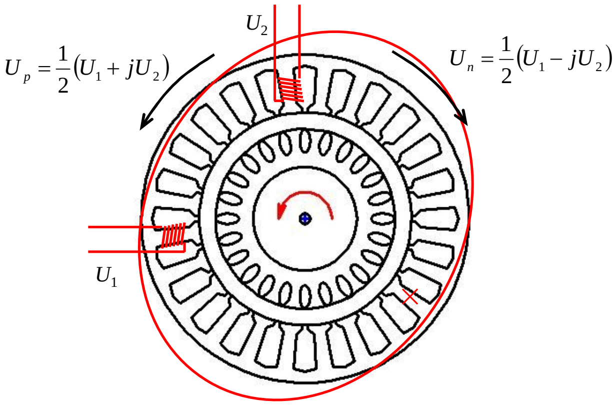
WG1：用語
WG2：データの解釈と診断技術

ROTATING ELECTRICAL MACHINES
Part-24: Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines
Application guide

WG10：電流診断　　N376
WG11：熱画像診断
WG14：AE診断
WG15：超音波診断

3DIM

探査コイル



Most important magnetic fields in the air-gap of a three-phase cage induction motor with an integral slot stator winding under normal operating and fault conditions

Fields under normal operating conditions

Origin of the field	Stator fields	Rotor fields	Item
Winding fields (Slot harmonics)	$f = f_L$	$f = f_L\left\{1+\frac{g_2 Q_r}{p}(1-s)\right\}$ $g_2 = 0;\ \pm 1;\ \pm 2;\ \ldots\ldots$	
Saturation fields	$f = 3f_L$	$f = f_L\left\{3+\frac{g_2 Q_r}{p}(1-s)\right\}$ $g_2 = 0;\ \pm 1;\ \pm 2;\ \ldots\ldots$	

Symbols

f_L : fundamental frequency

p : number of pole pairs, for which the motor designed

v : number of pole pairs in general

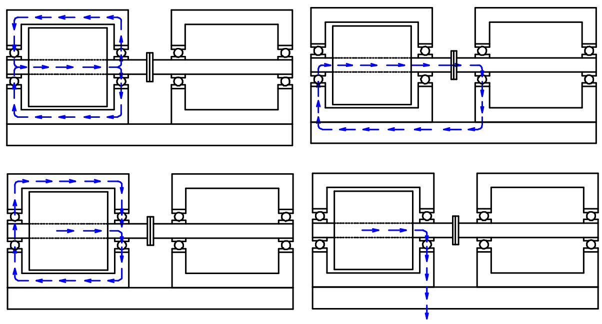
Qs : number of stator slots

Qr : number of rotor bars

s : slip

3DIM

軸電流



250mV(rms)以下

Most important magnetic fields in the air-gap of a three-phase cage induction motor with an integral slot stator winding under normal operating and fault conditions

additional fields under fault conditions

Origin of the Field	Stator fields	Rotor fields	Item
Interturn faults Phase- to –phase faults Double earth faults	$f = f_L$	$f = f_L\left\{\frac{g_2 Q_r}{p}(1-s)\pm 1\right\}$ $g_2 = 0;\ \pm 1;\ \pm 2;\ \ldots\ldots$ + positive sequence fields - negative sequence fields	
eccentricity	$f = f_L\left\{1\pm\frac{K}{p}(1-s)\right\}$ K=0 : static eccentricity	$f = f_L\left\{1+\left[\frac{g_2 Q_r}{p}\pm\frac{K}{p}\right](1-s)\right\}$ K=1 : dynamic eccentricity	
Rotor asymmetry		$f = f_L\left\{\frac{v_2}{p}(1-s)\pm s\right\}$ $v_2 = 1;\ 2;\ 3;\ \ldots\ldots$	

3DIM

Diagnosis of failures at a cage induction motor, equipped with two identical auxiliary coil system.

Kind of faults	Measured quantities				
	f	U_1	U_2	U_p	U_n
Winding fault	$f = f_L$	$U_1 \neq 0$	$U_2 \neq U_1 \neq 0$	$U_p \neq 0$	$U_n \neq 0$
Static eccentricity	$f = f_L$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$	$U_p \neq 0$	$U_n \neq 0$
Dynamic eccentricity	$f = f_L\left\{1\pm\frac{1}{p}(1-s)\right\}$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$		
Rotor asymmetry	$f = f_L\left\{\frac{1}{p}(1-s)\pm s\right\}$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$		