

# 磁区制御電磁鋼帯使用低損失柱上変圧器

Low Loss Pole Transformer applied with Domain Refined Grain-oriented Magnetic Steel Strip

鍋島 晃<sup>※1</sup>  
Akira Nabeshima

井戸 哲成<sup>※2</sup>  
Tetsunari Ido

In order to lower the loss of power distribution equipments, amorphous metal and domain refined grain-oriented magnetic steel strip have been introduced, whose losses are lower than that of the existing highly grain-oriented magnetic steel sheet.

This time using domain refined grain-oriented magnetic steel strip, two trial units of 30+20kVA hybrid three-phase transformer have been made.

In order to verify the performance, and to test the reliability, a long-term operation test has been conducted.

As the result of the performance test, core loss has been reduced to approx. 75% of the conventional transformer. Noise level has also been reduced by approx. 6 dB.

Further, through the long-term operation test, thermal and mechanical stability have been confirmed.

## 1 まえがき

現行の柱上変圧器の巻鉄心には、高配向性電磁鋼帯を用いている。

しかし、最近この高配向性電磁鋼帯表面に溝(けがき線)をいれた後、高温焼鈍することによって現用品より磁区幅を狭く制御し、鉄損を減少させた磁区制御電磁鋼帯が新日本製鐵㈱から市販された。

この電磁鋼帯の特性及び長期信頼性を確認するために、中部電力㈱殿と共同研究を行い、所期の性能を確認できたのでその概要を紹介する。

## 2 磁区制御による鉄損の減少

### 2.1 鉄損の諸要因

電磁鋼帯の鉄損は、表1に示すように主としてヒステリシス損と渦電流損(古典的渦電流損と異常渦電流損)に大別される。

そのうちヒステリシス損は、結晶方位、鋼の純度及び内部歪み、古典的渦電流損は、板厚及び固有抵抗、異常渦電流損は、結晶粒度、鋼帯に及ぼす張力(表面皮膜)などの影響で変化する。

従来、電磁鋼帯の鉄損の改善は、けい素(Si)添加量の増加、鋼の純度向上、結晶方位の改善及び板厚の薄手化

が主であった。

高配向性電磁鋼帯は、鉄損の軽減を図るために、結晶方向を圧延方向に一致させたり、板厚を薄くするが、一方では結晶粒が大きくなって、磁区幅が広くなるという欠点があり、鉄損改善が行き詰っていた。〔磁区の磁化方向の変化は、磁壁の移動で生じる。異常渦電流損はこの磁壁の移動速度に比例することから、磁壁の移動する距離(磁区の幅)が長いと移動に伴う損失が大きくなる〕

そのため、磁区幅の制御(磁区の細分化)によって鉄損を減少させる方法が注目されるようになった。

### 2.2 磁区を制御・細分化した電磁鋼帯

磁区幅を制御・細分化する方法として、レーザー照射による製品が既に市販されている。

表1 / 無負荷損(鉄損)の諸要因

Tab.1 / Factors influential in iron loss

	結晶方位	〔001〕方向が揃う程、鉄損は少ない
ヒステリシス損	鋼の純度	不純物が少ない程、鉄損は少ない
	内部歪	歪が少ない程、鉄損は少ない
	結晶粒径	小さい程、鉄損が少ない
渦電流損	皮膜張力	大きい程、鉄損は少ない
	固有抵抗	高い程(Si多い)、鉄損は少ない
	板厚	薄い程、鉄損は少ない

※1 中部電力株式会社 電力技術研究所

※2 変圧器事業部 第1設計部

この製品は、約500℃以上の焼鈍でその効果が殆ど消失してしまふ。そのため、巻鉄心変圧器のように製造工程中に約800℃での歪取り焼鈍を行うものを使用するとその効果がなくなってしまうため、積鉄心だけにその用途が限定されていた。

そこで更に高温熱処理にも耐える磁区細分化技術によって誕生したのが、ZDMHと呼ばれる磁区制御電磁鋼帯である。

ZDMHは、高配向性電磁鋼帯の表面に溝（けがき線）を導入した後、短時間の熱処理を行うことによって、歪み付与部に微細粒を発生させ磁区の細分化を図った電磁鋼帯である。

### 2.3 試作モデルによる特性調査

磁区制御電磁鋼帯の素材を検討し、柱上変圧器として使用可能かどうかを検討するため、実変圧器規模のモデルコア（モデル鉄心）による無負荷損特性の検証試験を実施した。

- ① 供試変圧器  
単相 60Hz 6600/210-105V 50kVA
  - ② 鉄心材料  
23ZDMH85（磁区制御電磁鋼帯）  
23ZH100（高配向性電磁鋼帯）
  - ③ 台数 10台
- 検証試験の結果、表2に示すように、素材特性に近い無負荷損特性がモデルコアによって得られた。

## 3 磁区制御電磁鋼帯を使用した柱上変圧器

### 3.1 仕様

試作モデルで得られた結果を基に、中部電力株殿の30+20kVAの三相共用変圧器の鉄心材料を23ZDMH85に変えて無負荷損失の低減を図ることとした。

表2/モデルコアの無負荷損特性

Tab.2/Iron loss characteristics of core model

材 料	項 目	W13/60	W15/60	W17/60
磁区制御電磁鋼帯 (0.23mm)	素材特性値 (W/kg)	0.565	0.743	0.996
	モデルコア実測値 (W/kg)	0.560	0.750	1.040
高配向性電磁鋼帯 (0.23mm)	素材特性値 (W/kg)	0.643	0.858	1.152
	モデルコア実測値 (W/kg)	0.640	0.840	1.200
現行の電磁鋼帯 (参考0.27mm)	形式品実測値 (W/kg)	0.720	0.990	1.380

(W13/60: 1.3T, 60Hzの鉄損)

### 3.2 試作結果

試作した変圧器の初期特性は表3に示すように、無負荷損失は高配向性電磁鋼帯使用の現行品に対して約75%に減少した。また、騒音値においては現行よりも、約6ホン減少するという良好な結果も得られた。

表3/試作品の特性比較

Tab.3/Characteristics comparison of trial transformers

項 目	特 性			
	現 行 品		試 作 品	
	30kVA	20kVA	30kVA	20kVA
無負荷電流 (%)	0.30	0.41	0.31	0.28
無負荷損 (W)	76	58	60	42
負荷損 (W)	396	292	395	292
効率 (%)	98.45	98.28	98.50	98.35
インピーダンス電圧 (V)	158	155	158	157
騒音 * <sub>1</sub> (ホン)	33.9		28.1	
外形寸法 (mm)	幅625×奥行725×高さ1285			
重量 (kg)	310			

(現行品: 4台の平均値, 試作品: 2台の平均値)

\*<sub>1</sub>: 30kVA, 20kVA共同一タンク内に収納されるため、騒音値は同一値。

## 4 長期課通電試験の実施

磁区制御電磁鋼帯使用変圧器の信頼性を検証するため、変圧器の期待寿命とされる30年に相当する熱履歴を試作器に与える、課通電試験を実施した。

### 4.1 試験方法

試料の熱的期待寿命をJEC-204で油入変圧器に期待している30年とし、これに相当する熱的寿命損失量をアレニウスの計算式に従って試料に付与し試験を行った。なお、三相共用変圧器は、65℃ライズ油入変圧器のため期待寿命算定基準温度は、55℃ライズ油入変圧器の期待寿命算定基準温度がJEC-204で95℃と規定されているので、10℃アップした105℃とした。

試験期間については、平成元年に実施した75+50kVAの長期課通電試験と比較するために同じ90日間とした。

### 4.2 試験回路

図1に示す返還負荷法で実施した。

### 4.3 試験条件の算出

(1) 巻線最高点温度の計算

巻線最高点温度が一定の場合の寿命損失は、次式によって計算する。

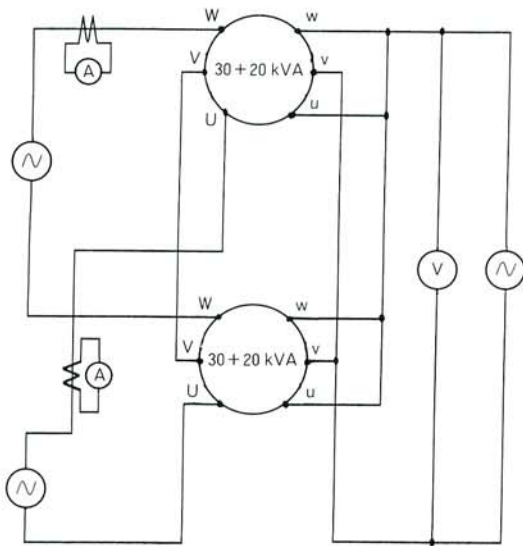


図1 / 試験回路 (返還負荷法)  
Fig.1/Test circuit (Loading-back method)

$$A = te^{NT} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

- ここに A : 劣化単位 = 1 / 寿命損失
- t : 時間
- N : 0.1155 (寿命半減温度 6°C)
- T : 巻線最高点温度 (°C)

①式から、期待寿命算定基準温度105°Cで30年連続運転の劣化単位を求めると次のとおりとなる。

$$A = 30 \times 365 \times e^{0.1155 \times 105} = 2.02 \times 10^9 \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

ここで、長期課通電試験によって90日間で30年相当になる巻線温度を求めると次式となる。

$$T = \frac{1}{N} - \ln \frac{A}{t} = \frac{1}{0.1155} \ln \frac{2.02 \times 10^9}{90} = 147^\circ\text{C}$$

この巻線最高点温度147°Cから試験期間中の平均周囲温度5°Cを引いた142°Cを試験期間中の巻線最高点温度とした。

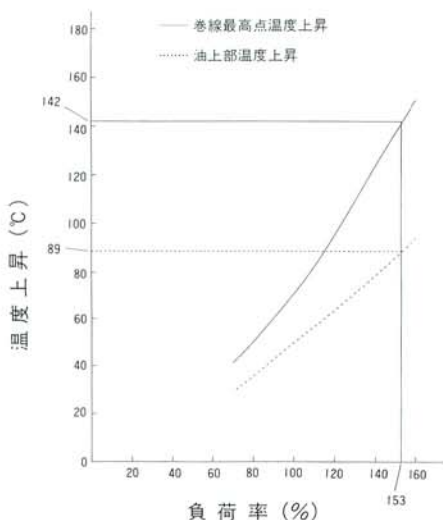


図2 / 負荷-温度上昇曲線  
Fig.2/Load vs. temperature rise curve

表4 / 長期課通電試験の劣化単位

Tab.4/Deterioration unit unit under long term loading test

油上部 温度°C	巻線最高 点温度°C	1号器		2号器	
		日数	劣化×10 <sup>9</sup>	日数	劣化×10 <sup>9</sup>
75	128	1	0.01	—	—
80	133	12	0.06	6	0.03
85	138	16	0.13	17	0.14
90	143	20	0.30	17	0.25
95	148	19	0.49	22	0.57
100	153	12	0.57	16	0.76
105	158	8	0.67	9	0.76
110	163	—	—	1	0.15
合計		88	2.23	88	2.66

(2)試験負荷率の選定

試作変圧器の巻線最高点温度を、試験中は油上部温度で管理するため、図2の「負荷-温度上昇曲線」から、142°Cになる負荷率、油上部温度上昇値を求めると、負荷率153%、油上部温度上昇値89°Cが得られる。

## 4.4 長期課通電試験における熱的寿命損失

(1) 劣化単位の算出

長期課通電試験における油上部温度上昇から、巻線最高点温度を計算した結果を表4に示す。

(2) 熱的寿命損失量の算出

表4の劣化単位の合計値と105°Cでの30年連続運転時の劣化単位から、今回の長期課通電試験による熱的寿命損失年数を算出すると次の結果になる。

$$1号機 \quad \frac{2.23 \times 10^9}{2.02 \times 10^9} \times 30年 = 33.1年$$

$$2号機 \quad \frac{2.66 \times 10^9}{2.02 \times 10^9} \times 30年 = 39.5年$$

この結果より今回の試験において、試験条件の熱履歴30年相当は充分満たされている。

## 5 エンド・ポイント試験

### 5.1 エンド・ポイント試験条件

初期性能試験、課通電期間中2回の間中間試験及び最終性能確認試験を実施した。

この試験によって、任意の寿命損失量における無負荷三特性(無負荷電流、無負荷損失、騒音)の劣化状態を把握すると共に、試料の熱的、機械的及び電気的性能を確認した。

なお、試験前、中間のエンド・ポイント試験は、その時の試料の性能を確認する意味合いと、試験自体によってフィールド運転中のストレスを模擬し付与する目的で行った。表5にエンド・ポイント試験条件を示す。

表5/エンド・ポイント試験条件

Tab.5/End-point test condition

試験項目	試験時期	試験前	中間試験		試験後
			30日	60日	
無負荷電流及び無負荷損試験		○	○	○	○
騒音試験		○	○	○	○
励磁突入電流試験		○	○	○	○
短絡強度試験	全負荷電流の15倍×2秒間	○	○	○	○
	全負荷電流の25倍×2秒間				○
素材の検証		○			○
負荷損及びインピーダンス電圧試験			○	○	○
絶縁抵抗試験		○	○	○	○
雷インパルス耐電圧試験 (一次巻線)	(非接地) 全波 (+) 40kV (一端接地) 全波 (+) 40kV		○	○	○
	(非接地) 全波 (+) 60kV (一端接地) 全波 (+) 60kV (一端接地) さい断波 (+) 65kV	○			○
商用周波耐電圧試験	1次~2次巻線及び鉄心10kV/1分		○	○	○
誘導耐電圧試験	1次~2次巻線及び鉄心22kV/1分	○			○
誘導耐電圧試験	常規誘起電圧の1.3倍		○	○	○
誘導耐電圧試験	常規誘起電圧の2倍	○			○
絶縁油試験	ガス分析	○	○	○	○
	全酸価試験	○	○	○	○
	水分試験	○	○	○	○
	絶縁耐圧試験	○	○	○	○
体積抵抗率試験	○	○	○	○	
部分放電試験	誘導法	○	○	○	○

表8/参考試験結果

Tab.8/General test result

試験項目	30kVA							
	試験前		30日後		60日後		試験後	
	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機
負荷損 (W)	395	394	396	395	392	393	394	392
インピーダンス電圧 (V)	158	157	159	157	157	156	158	157
絶縁抵抗 (MΩ)	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上
雷インパルス耐電圧試験	良	良	良	良	良	良	良	良
商用周波耐電圧試験	良	良	良	良	良	良	良	良
誘導耐電圧試験	良	良	良	良	良	良	良	良
部分放電試験	良	良	良	良	良	良	良	良

試験項目	20kVA							
	試験前		30日後		60日後		試験後	
	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機
負荷損 (W)	292	291	292	292	287	286	291	290
インピーダンス電圧 (V)	158	156	159	158	157	156	158	157
絶縁抵抗 (MΩ)	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上	2000以上
雷インパルス耐電圧試験	良	良	良	良	良	良	良	良
商用周波耐電圧試験	良	良	良	良	良	良	良	良
誘導耐電圧試験	良	良	良	良	良	良	良	良
部分放電試験	良	良	良	良	良	良	良	良

表6/鉄心性能検証試験結果

Tab.6/Test result of core characteristics

試験項目	30kVA							
	試験前		30日後		60日後		試験後	
	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機
無負荷電流 (%)	0.30	0.32	0.30	0.32	0.30	0.31	0.29	0.32
無負荷損 (W)	59	60	58	59	59	60	59	60
騒音 * <sub>2</sub> (ホン)	28.3	27.8	27.4	27.4	27.5	26.9	27.6	27.0
励磁突入電流 (倍)	19.1	21.2	21.8	21.8	26.7	25.5	28.1	23.8
短絡強度試験 (15倍×2秒)	良	良	良	良	良	良	良	良
短絡強度試験 (25倍×2秒)	-	-	-	-	-	-	良	良

試験項目	20kVA							
	試験前		30日後		60日後		試験後	
	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機	1号機	2号機
無負荷電流 (%)	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.28
無負荷損 (W)	42	42	41	41	43	43	43	43
騒音 * <sub>2</sub> (ホン)	28.3	27.8	27.4	27.4	27.5	26.9	27.6	27.0
励磁突入電流 (倍)	16.7	22.3	19.9	20.7	21.8	23.9	21.5	23.3
短絡強度試験 (15倍×2秒)	良	良	良	良	良	良	良	良
短絡強度試験 (25倍×2秒)	-	-	-	-	-	-	良	良

\*<sub>2</sub>: 30kVA, 20kVA共同一タンク内に収納されるため、騒音値は同一値。

表7/鋼帯の機械的性能試験

Tab.7/Mechanical characteristics of core material

	長期課通電試験前	長期課通電試験後
降伏点 (kgf/mm <sup>2</sup> )	34	33
引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	35	36
伸び (%)	8	6
繰り返し曲げ (回)	17	18

## 5.2 エンド・ポイント試験結果

長期課通電試験結果の鉄心性能検証分を表6、表7に示すが、試験前(初期値)とほとんど変化はなく、わずかな差は測定誤差範囲と考えられ、鉄心の劣化は全くないものと思われる。また、参考試験結果は表8に示す。

## 6 考察

鉄心性能検証試験、参考試験において特性値の変化、異常は認められなかった。

このことから、磁区制御電磁鋼帯使用変圧器は30年間フィールドでの使用に十分耐えるものと考えられる。

## 7 あとがき

配電用変圧器の無負荷損失の軽減は、世界的な省エネルギー、地球環境の改善が叫ばれるなか、今後益々その重要度が増して行く。

この損失の軽減方法として、アモルファス磁性材料、磁区制御電磁鋼帯材料の使用が考えられる。

今回このうちの磁区制御電磁鋼帯を使用して、実器性能把握を目的に30+20kVAの三相共用変圧器を試作し、その特性と信頼性の検証を実施した。

その結果、無負荷損が現行品の75%に減少するという結果と30年相当の熱履歴にも十分耐えるという結果を得て、今後磁区制御電磁鋼帯の使用になんら問題のないことを確認した。

また、磁区制御電磁鋼帯はベース材料が普通の高配向性電磁鋼帯であるので、現有の変圧器生産設備がそのまま使用できるというメリットもある。

価格面では、現行の高配向性電磁鋼帯よりも高価であるため、現行品よりも上昇するが、省エネルギー化、コンパクト化、低騒音化、軽量化の要求が変圧器に対して

今後益々強くなることから、磁区制御電磁鋼帯が将来的に使用されることが十分考えられる。

最後に、本研究を進める機会を戴いた中部電力㈱殿、本研究にご協力戴いた新日本製鐵㈱殿に感謝を申し上げます。

## 最近公開された愛知出願

### 特許

公開番号	名 称	発 明 者	共同出願人
4-3995	印刷配線回路基板の実装部品取付構造	滝野 秀雄 木村 信正	
4-14534	衛生洗浄装置の誤操作防止装置	太田 久義 藤井 庄吉 安達 弘之	東陶機器㈱
4-32290	立体配線回路基板	滝野 秀雄 橋爪 修 木村 信正 恒川 茂樹	
4-54820	超電導コイルの保護装置	佐藤 徹	
4-55532	スイッチ取付基板の取付構造	滝野 秀雄 木村 信正	
4-69055	スイッチングレギュレータ	片平 洋一	
4-93428	衛生洗浄装置の着座検出装置	藤井 庄吉 太田 久義 安達 弘之	東陶機器㈱
4-93429	衛生洗浄装置の着座検出装置	太田 久義 藤井 庄吉 安達 弘之	東陶機器㈱
4-97029	衛生洗浄装置の着座検出装置	太田 久義 藤井 庄吉 安達 弘之	東陶機器㈱
4-105620	シートペーパー自動供給便座	山下 直治	東陶機器㈱
4-121996	照明装置及び該装置に用いるインバータ	太田 久義 高嶋 修 土本 僚一	
4-121998	放電灯点灯装置	太田 久義 岡本 隆生	
4-146341	衛生洗浄装置	横山 武弘 野々村勝巳 大橋 政紀	東陶機器㈱
4-161239	攪拌装置	近藤 茂之	愛知電機商事㈱
4-170926	トイレットペーパー自動切断・供給装置	山本 修	
4-172988	ブラシレスモータの回転子位置検出回路	太田 久義	アイチーエマンソン電機㈱
4-188711	再生油使用変圧器の除染方法及び除染装置	奥村 顕治 林 幸雄	中部電力㈱
4-193128	シートペーパー自動供給便座	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-200240	電力線搬送制御装置	立松 聡 安達 隆義	
4-206499	放電灯点灯装置	土本 僚一 岡本 隆生	
4-219906	静止誘導電気機器及びその製造装置	矢後 克二	

公開番号	名 称	発 明 者	共同出願人
4-245412	静止誘導電気機器及びその製造方法	矢後 克二	
4-297213	トイレットペーパー自動巻取・切断装置	山本 修 安達 隆義	
4-299812	静止誘導電気機器の製造方法	大竹 和博 河村 良二 永田 徹 井戸 哲成	
4-299892	平滑配線回路基板及びその製造方法	滝野 秀雄 橋爪 修 木村 信正 恒川 茂樹	
4-302077	車輛の運行データ記録方式	野尻 孝 大鹿 正喜	
4-309314	振動対策を具備したシートペーパー自動供給便座	野々村勝巳 山下 直治	東陶機器㈱
4-322624	電池駆動のシートペーパー自動供給便座	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-326502	巻鉄心変圧器及びその製造方法	廣江 成致 大竹 和博 河村 良二 永田 徹 井戸 哲成	
4-332512	シートペーパー自動供給便座における着座検出手段への通電方法	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-336018	シートペーパー自動供給便座	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-336019	シートペーパー自動供給便座におけるペーパー位置検出手段への通電方法	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-338891	車輛の運行データ記録方式	野尻 孝 大鹿 正喜	
4-339254	ガス封入電気機器における分解ガス検出方法及びその装置	神谷 俊郎 佐藤 一彦 伊藤 康裕	
4-347118	シートペーパー自動供給便座におけるペーパー繰出機構部の制御方法	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-352921	便座用シートペーパー自動繰出装置	山下 直治 安達 隆義	東陶機器㈱
4-369466	ガス封入電気機器の異常検出装置	神谷 俊郎 佐藤 一彦 矢野 純一	
4-370774	ガス絶縁電気機器の異常検出装置	神谷 俊郎 矢野 純一 佐藤 一彦	