

配電用変圧器の損失と最新技術動向

(一財)建築コスト管理システム研究所・新技術調査検討会

1 はじめに

建築の電気設備工事で設置される機器は、照明器具のLED化に代表されるように、様々な設備で省エネ化が図られている。多くの事務所ビル等の建築物は、高圧電圧（6.6kV）で電力が供給され、施設内の受変電設備の配電用変圧器によって、使用電圧（200V、100V）に降圧され、電気機器に供給している。電力設備において、この配電用変圧器の高効率化がめざましいことから、今回「配電用変圧器」の技術動向について、紹介する。

配電用変圧器の技術は、低損失化、小型軽量化、高信頼度化等のニーズに応えながら改善が進められてきた。中でも、オイルショック以降、配電用変圧器の省エネに対する要望は強く、そのニーズに対応した低損失化を主体として進歩してきた。近年においては、配電用変圧器が特定エネルギー消費機器に指定（3.1に記載）されて以降、トップランナー変圧器から更なる省エネ性能を追求した変圧器のニーズが拡大しつつある。特に、東日本大震災を契機とした太陽光発電の広まりや省エネ志向の高まりにより、更に省エネ変圧器の需要が増大し、今後も拡大していくと予想される。

本稿においては、配電用変圧器の技術変遷と最新の配電用変圧器に関わる内容について紹介する。

2 配電用変圧器技術の変遷

配電用変圧器の技術変遷には、低損失化・小型軽量化の技術推移と安全性、高信頼性の技術推移

の二つに大きく分けられる。

2.1 配電用変圧器技術の推移

配電用変圧器の技術変遷には様々な事項があるが、昭和30年代から現在までで、特記すべきは主に次の事項である。

2.1.1 方向性電磁鋼帯の開発

昭和30年代に方向性電磁鋼帯が出現し、これを使用した巻鉄心が開発された。まず初めに、単相小容量器に適用され、無負荷損が大幅に改善された。それ以降、材質のグレードアップとともに、適用機種が小容量器から大容量器に拡大され、現在ではほとんどの配電用変圧器の鉄心に採用されている。更に高配向性電磁鋼帯や磁区制御電磁鋼帯の開発も進み、配電用変圧器の低損失化に寄与している。

2.1.2 巻線技術

昭和40年代前半に銅材の価格急騰を契機に、配電用変圧器導電材料のアルミ化が進み、それに伴って、配電用変圧器の軽量化が推進された。また、昭和40年代に低圧導体へのシート導電材料の適用や、接着絶縁紙（コイルの電線層間の絶縁として絶縁紙表面にエポキシ樹脂をパターン状に半硬化状態で配置し、加熱乾燥時に硬化、コイルを固着する）の採用により、配電用変圧器の中身構造の簡略化や鉄心窓内におけるコイル導体の占積率の改善がなされ、小型・軽量化に寄与している。

2.1.3 不燃性油の生産中止と不・難燃性変圧器

昭和40年代後半に不燃性油（PCB）の生産が中止され、これを機に乾式モールド変圧器やSF₆ガス絶縁変圧器等の不・難燃性変圧器が注目されるようになった。また、昭和50年代後半より、安全性・信頼性重視の社会的ニーズの高まりに伴って、その需要は着実に伸びてきている。

2.1.4 三相巻鉄心と省エネルギー化

昭和50年代のオイルショックによりエネルギーコストが急騰した。それに伴い、省エネ志向が高まり始め、三相変圧器にも方向性電磁鋼帯が使用されるようになり、三相巻鉄心シリーズが標準化された。これにより配電用変圧器のより一層の低損失化が推進された。

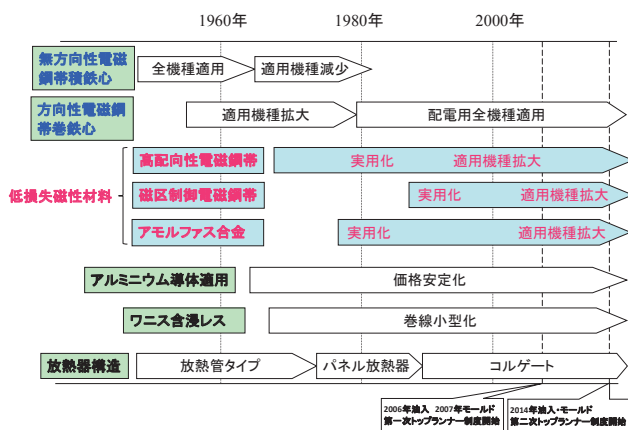


図1 配電用変圧器の技術変遷

2.2 配電用不・難燃性変圧器の推移

変圧器の不・難燃化は、省エネとは別に安全重視の社会的ニーズとして存在してきた。それに基づき、今日まで開発が進められてきている。

配電用変圧器は、油入式が最も長い歴史と使用実績を有しており、多くの改良を重ねられ、今日に至る。防災面から見ても、鋼板製のタンクに絶縁油が密閉され、電力ヒューズや遮断器等の保護装置が設けられているため、油入機器自体から火災が発生する可能性は、ほとんどない。このように油入変圧器の信頼性、防災性は高いものであ

る。しかしながら、可燃性の絶縁油を使用している以上、万一の場合における引火、類焼を防ぐには更に高いレベルの難燃性変圧器が必要になる。

近年では、火災に対する安全確保が特に重要視されるビル・工場・鉄道などの受配電設備における不・難燃性変圧器のニーズがますます高まっている。

不・難燃性変圧器の代表例であるガス絶縁変圧器、モールド変圧器の特徴を次に示す。

2.2.1 ガス絶縁変圧器

不燃性製ガス（SF₆ガス）を冷却媒体として使用している点を除けば、構造そのものは油入変圧器に類似している。巻線・鉄心などの変圧器本体は密封式タンクに収納されているため、屋内外問わず使用できる。ただし、SF₆ガスは温室効果ガスのためリサイクル使用を前提とした排出抑制対象ガスとなっている。

2.2.2 モールド変圧器

難燃性の樹脂を変圧器巻線部の保護材として用いた乾式変圧器で、防災の面からビル・公共設備等で広く使用されている。巻線、鉄心などの変圧器本体は、油入変圧器及びガス絶縁変圧器とは異なり直接外気にさらされるため、設置環境の影響を受けやすく、屋内使用に限定される。しかし、変圧器本体を容器に収納する必要がないことから、他の変圧器と比べ、設置面積が小さく電源盤やキュービクルへの収納性が高いといったメリットを持っている。

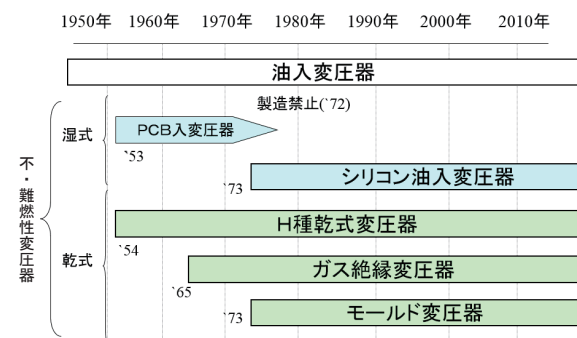


図2 配電用変圧器の変遷

	油入変圧器	モールド変圧器	ガス絶縁変圧器	H種絶縁乾式変圧器
外觀例				
防災性	○	◎	◎	◎
耐環境性	◎ (屋内外で使用可)	○ (屋内専用)	◎ (屋内外で使用可)	○ (屋内専用)
トッランナー方式	対象 ※一部対象外あり			対象外

図3 配電用変圧器の種類

表1 各配電用変圧器の特徴

	鉱油入変圧器	シリコン油入変圧器	ガス絶縁変圧器	モールド変圧器
耐熱クラス	A	H以下	H以下、一般にはEを適用	H以下、一般にはF又はBを適用
冷却方式	自冷式または強制冷却			
絶縁強度	鉱油入変圧器と同一			油入変圧器より低い(6.6kV以下では油入と同一)
耐湿・耐塵性	◎	◎	◎	○
防災性	保護装置が適正装備されていれば、発火の可能性は極めて低い	不燃、非爆発性ガスを密封した構造となっており発火しない	難燃材料で構成されており、発火しない	
寿命	・20～30年 ・鉱油入変圧器以外は長期の使用実績はないが、使用されている材料評価から判断していずれの形式の変圧器も20～30年の寿命は期待できる			
適用	耐環境性が高く、屋内外いずれも適用できる 単独据付、キュービクル収納または直結ができる		単独据付、キュービクル直結に適している	・一般屋内用 ・キュービクル収納に適している

3 最新の配電用変圧器

3.1 トッランナー変圧器

3.1.1 トッランナーとは

2003年4月1日に改正施行された「省エネ法施行令」により、特定機器（現：特定エネルギー消費機器）に、産業用機器として初めて高圧受電用油入変圧器及びモールド変圧器が指定された。特定機器とは、「我が国において大量に使用され」、「その使用に際し相当量のエネルギーを消費する」、「エネルギー消費性能の向上を図ることが特に必要なもの」として政令で定められた機器を指す。特定機器に定められたことにより、省エネルギー化の基準値である基準エネルギー消費効率が定められた。これは、エネルギー消費性能が最も優れた製品のエネルギー消費性能に、将来の技術

開発の見通しを勘案して定められる。エネルギー消費性能が最も優れた製品の性能を用いる基準値の決定方法をトッランナー方式という。

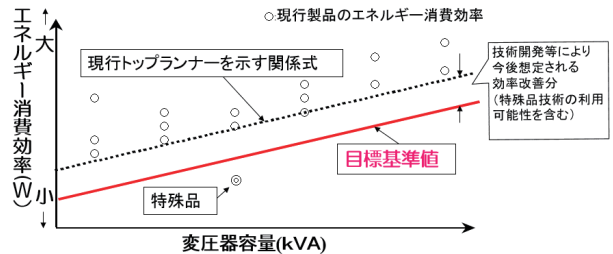


図4 トッランナー方式

基準エネルギー消費効率を満足した製品に切り替えなければならない年を目標年度と呼び、第一次の目標年度は、油入変圧器が2006年度、モールド変圧器が2007年度であった。この基準エネルギー消費効率を満足する変圧器は、トッランナー方式で定められた基準値を満足することから、トッランナー変圧器と呼称することに業界として定めた。これがトッランナー変圧器の始まりであり、「変圧器の性能の向上に関する製造事業者等の判断の基準等」（平成14年経済産業省告示第438号）に規定されている基準エネルギー消費効率を上回らないようにすることが製造事業者等に義務づけられた。

現在は、第一次トッランナーから、もう一段省エネルギー化を推し進めた第二次の基準エネルギー消費効率が定められている。油入変圧器もモールド変圧器も目標年度が2014年度であることから、トッランナー変圧器2014と呼称されている。トッランナー変圧器2014の基準値を満たす製品には、図5のラベルが貼付されている。



図5 省エネルギーラベル

表2 特定エネルギートッランナー変圧器2014の機器適用範囲

	適用範囲	適用除外機種
機種	油入変圧器 モールド変圧器	ガス絶縁変圧器 H種乾式変圧器
容量	単相10～500kVA 三相20～2,000kVA	スコット結線変圧器 柱上変圧器
電圧	一次電圧6kVまたは3kV 二次電圧100～600V	モールド灯動変圧器 水冷または風冷変圧器 3巻線以上の多巻線変圧器

3.1.2 基準エネルギー消費効率

変圧器のエネルギー消費効率とは、500kVA以下が負荷率40%、500kVA超過が負荷率50%における全損失のことであり、トッランナー変圧器は、これが基準エネルギー消費効率よりも低くなければならない。標準仕様変圧器の基準エネルギー消費効率は、表3の算定式から求められる。標準仕様は、表4に示すとおりであり、ここから外れるものを準標準仕様といい、準標準仕様の基準エネルギー消費効率は、表3の算定式に油入変圧器が1.1倍、モールド変圧器は1.05倍した値となる。各年度において表3の区分毎に出荷台数によるエネルギー消費効率の加重平均が基準値を上回らないことが義務づけられているが、製品個々においては+10%の裕度があり、基準値の+10%まで許容されている。

表3 基準エネルギー消費効率の算定式

機種	区分			基準エネルギー消費効率の目標 基準値算定式
	相数	定格 周波数	定格容量	
油入	単相	50Hz	500kVA以下	$E = 11.2 \times (\text{kVA})^{0.732}$
		60Hz	500kVA以下	$E = 11.1 \times (\text{kVA})^{0.725}$
	三相	50Hz	500kVA以下	$E = 16.6 \times (\text{kVA})^{0.696}$
			500kVA超	$E = 11.1 \times (\text{kVA})^{0.809}$
		60Hz	500kVA以下	$E = 17.3 \times (\text{kVA})^{0.678}$
			500kVA超	$E = 11.7 \times (\text{kVA})^{0.790}$
モールド	単相	50Hz	500kVA以下	$E = 16.9 \times (\text{kVA})^{0.674}$
		60Hz	500kVA以下	$E = 15.2 \times (\text{kVA})^{0.691}$
	三相	50Hz	500kVA以下	$E = 23.9 \times (\text{kVA})^{0.659}$
			500kVA超	$E = 22.7 \times (\text{kVA})^{0.718}$
		60Hz	500kVA以下	$E = 22.3 \times (\text{kVA})^{0.674}$
			500kVA超	$E = 19.4 \times (\text{kVA})^{0.737}$

表4 標準仕様（高圧側電圧は6kV）

相数	容量	低圧側電圧	結線
単相	10～500kVA	210-105V	単三専用
三相	20～50kVA	210V	Yy0
	75～500kVA	210V	Yd1
	750～1,000kVA	210V	Yd1, Dd0
			Dd0
	1,500～2,000kVA	210V	420V (50Hz)
440V (60Hz)			Dyn11

3.1.3 トッランナー変圧器2014

油入変圧器もモールド変圧器も第一次基準に対応していたのが、M社を例に挙げるとトッランナー変圧器のNシリーズだったが、トッランナー変圧器2014施行により、Rシリーズに切り替わった。

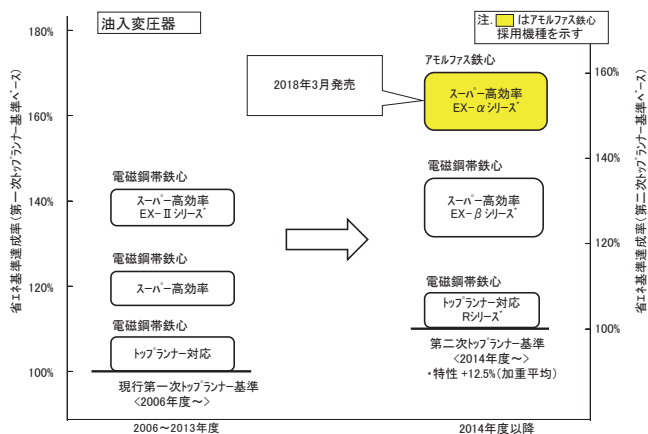


図6 トッランナー変圧器省エネ基準達成率（油入変圧器）

また、図6に示すようにトッランナー変圧器Rシリーズよりも更に高効率な変圧器もラインアップしており、詳細は次項で紹介する。

3.2 スーパー高効率変圧器

前項、図6に示すようにトッランナー変圧器の上位ラインアップもあり、トッランナー変圧器より更に高い省エネ性能を求める場合の選択肢も存在する。

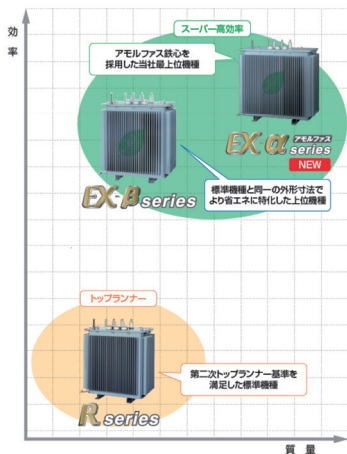


図7 油入変圧器ラインアップ



図8 モールド変圧器ラインアップ

3.2.1 スーパー高効率変圧器の種類

M社のスーパー高効率変圧器のラインアップは、図7、図8のとおりであるが、油入変圧器を例に詳細を説明する。

(1) スーパー高効率油入変圧器EX-αシリーズ

省エネ追求市場に対応し、省エネ性能改善に特化したM社省エネ変圧器の最上位機種である。鉄心材料にアモルファス合金を採用し、無負荷損の低減に特化しており、また、巻線の最適化設計により、省エネ基準達成率140%¹を達成している。特に、無負荷損が小さいため、低負荷率領域で、効率が最も高くなる(図9)。

(2) スーパー高効率油入変圧器EX-βシリーズ

鉄心材料に最高級グレードの電磁鋼帯を採用し、巻線の最適化設計により、省エネ基準達成率

120%¹を達成している。省エネ追求型の変圧器ながら、トップランナーRシリーズと同一の外形寸法を実現しており、限られたスペースで、省エネ変圧器を選択したい場合に向いている。また、EX-αと比べると負荷損が比較的小さいため、こちらはEX-αよりも高負荷率領域で、効率が最も高くなる(図9)。

以上のように、それぞれ特長があるため、設置スペースや負荷率等を考慮し、最適な変圧器を選定することが望ましい。

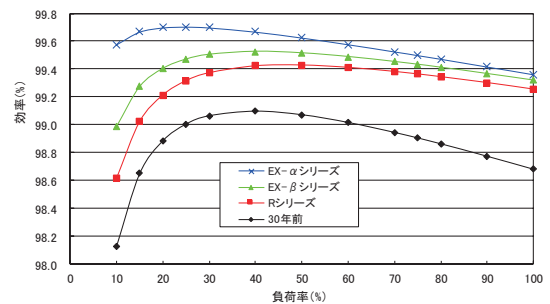


図9 効率比較
(油入三相1,000kVA50Hz 負荷率50%)²

4 損失コスト

4.1 変圧器の低損失化技術

変圧器の損失は、大きく無負荷損と負荷損に分けられる。無負荷損は、主に鉄心から発生し、負荷に関係なく常時発生する。負荷損は、主に巻線から発生し、負荷電流の二乗に比例して発生する。省エネ変圧器の高効率化は、この両方の損失を低減することで実現している。

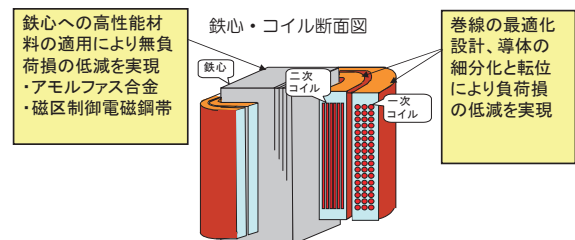


図10 無負荷損と負荷損の低減

1 変圧器の仕様により、異なる。

2 代表値での試算結果。

4.2 省エネ効果

M社における30年前の変圧器と各シリーズの比較を次に示す。

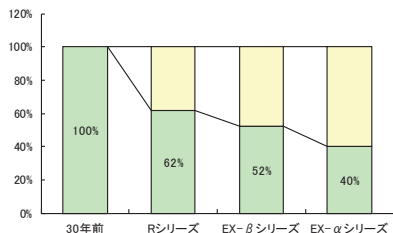


図11 損失比較

(油入三相1,000kVA50Hz 負荷率50%)²

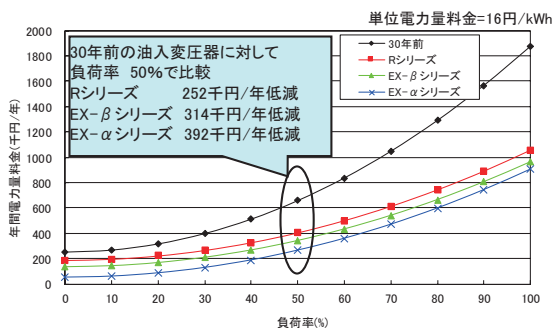


図12 更新による省エネ効果

(油入三相1,000kVA50Hz 負荷率50%)²

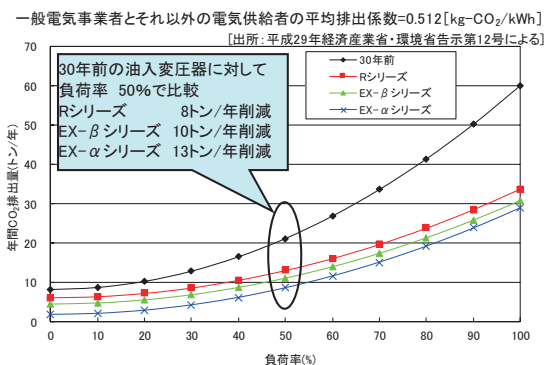


図13 更新によるCO₂排出量削減効果

(油入三相1,000kVA50Hz 負荷率50%)²

図11のとおり、30年前の変圧器に対して、標準のトップランナー変圧器で38%、超高効率変圧器で48～60%の損失削減ができ、電気料金で250千円以上(図12)、CO₂で8トン/年以上(図13)の削減が可能となる。

4.3 設置スペース

M社各シリーズの外形寸法の比較を図14に示す。

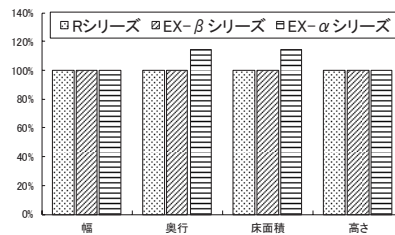


図14 外形寸法比較

古い変圧器を更新するだけでも大きく省エネに貢献できることが確認できる。より省エネ性能の高い変圧器に替えることで、その分CO₂の排出量を削減でき、環境配慮に繋がることが期待できる。

ここでは、基準負荷率における省エネ効果を一例として取り上げたが、より効果的な省エネのために、各変圧器の特徴、適切な負荷率を考慮し、状況に応じた適切な選定を行うことが望ましい。

5 今後の動向

発展途上国の人口の増加や工業化に伴い、CO₂排出量は、ますます増加し、先進国においては、太陽光発電や風力発電等の自然エネルギーを利用した発電がより活発化すると考えられる。こうした背景もあり、より環境配慮型の省エネ変圧器の需要は今後ますます伸びてくると予想され、それに伴った規制や省エネ化の技術がより発展していくと考えられる。

6 おわりに

配電用変圧器のこれまでの社会的ニーズの変遷と技術推移について説明してきたが、今後は、メーカーの環境に配慮した製品開発への努力とともに、ユーザーの環境に配慮した適切な製品選定・メーカーへの要求の双方が更に重要になってくる。地球環境保護の観点からも適切に省エネ変圧器を選定し、効果的な省エネを図る必要がある。

最後に本稿をまとめるにあたり、三菱電機(株)FAシステム事業本部名古屋製作所配電制御製造部変圧器設計課 永島圭祐氏に多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。