

蒸発冷却形変圧器(LVACS)の開発

Development of the power transformer with the evaporative radiation system.

下山勝利*	梶村和成*
K. Shimoyama	K. Kajimura
後藤寿之*	三島修一*
H. Goto	S. Mishima
小林卓士**	清滝和雄***
T. Kobayashi	K. Kiyotaki

概要

近年の『受変電設備の縮小化』と言う市場ニーズに応えるべく、ヒートパイプの原理を応用した新しい放熱方式の変圧器を開発した。この放熱方式は、冷媒の潜熱を利用して変圧器本体から吸熱し、この熱を放熱器パネルに伝達して放熱するもので、高性能なため放熱器の小形化が可能となり変圧器設置面積の縮小化に成功した。本稿では、その概要を紹介する。

Synopsis

In recent years, the requirement of the miniaturization of the substation equipments becomes greater and greater. To meet this requirement, we have developed the new compact power transformer with the new radiation system which applied the principle of heat-pipe. This system is very highly efficient because of using latent heat of the refrigerant to take heat away the box which contained the core and winding, transport it, and transfer it to radiator panels, so we have succeeded in making radiators and the placing area of the transformer small.

In this paper, we introduce the outline of this new radiation system and transformer.

1. まえがき

変圧器は使用中にコイルや鉄心部分で銅損や鉄損による熱が発生する。この機器内部で発生した熱を『いかに効果的に外部に放出するか』が変圧器の設計製作上極めて重要な課題となっている。このため一般的に変圧器は相応の放熱器を備えてここから放熱しているが、自冷式(自然冷却形)の大容量変圧器では、放熱器が変圧器本体より大きなものも少なくない。

今回開発した変圧器は、冷却媒体の蒸発吸熱作用を利用して機器内部の熱を吸収し、蒸発した冷媒蒸気が放熱器に移動し、ここで凝縮することにより放熱をする、いわゆる『ヒートパイプの原理』を利用したもので、『吸熱効率』と『熱搬送速度』を高めることで放熱器の小形化に成功した。以下にこの蒸発冷却形変圧器(LVACS)の概要を報告する。

2. 新しい放熱システムの開発

(1) 変圧器の放熱システムについて

変圧器は一般的には、絶縁媒体として使用している『絶縁油』や『SF₆ガス』を冷却媒体と兼用している。したがって変圧器内部で発生する熱を外部に搬出するためには、まずこの冷却媒体に変圧器内部の熱を吸収させ、吸熱した冷却媒体を放熱器に循環することにより放熱している。

したがって変圧器内部の熱を効率良く外部に搬出するためには、内部の熱を『効率良く冷却媒体に伝達し』さらにこの冷却媒体を『迅速に放熱器まで搬送する』ことが重要な課題となる。

(2) 蒸発吸熱システムの採用

冷却媒体に『効率良く熱を伝達する』と言うことは、

* グローバル事業本部
** 産業・電力システム事業本部
*** 技術開発研究所

換言すると冷却媒体に『効率良く熱を吸収させる』と言うことになる。

一般的に従来の変圧器は、絶縁媒体の温度上昇に伴う蓄熱顕熱として熱を吸収させ、この蓄熱した絶縁媒体を放熱器に循環させることにより放熱をさせている。この方式では、その媒体の比熱によって決定される顕熱分の熱量しか吸収できないため、多量の熱を吸収して搬送するためには搬送ポンプなどを利用して多量の媒体を強制的に循環することで搬送能力を補う必要があった。

しかし今般着目した蒸発吸熱方式を採用すると、物質の相変化に伴う潜熱が利用できるため、媒体の単位重量当たりの吸熱容量を桁違いに大きく取ることができる。すなわち『夏の打ち水』や『アルコール消毒』の際の清涼感をそのまま吸熱システムに採用する訳である。

ちなみに水の顕熱を利用した場合には『1ccの水の温度を50 上げる際に吸収できる熱量は50cal』、蒸発潜熱を利用した場合には『1ccの水が蒸発する際に吸収する熱量は約540cal前後』となる。

(3) ヒートパイプの原理を応用した熱の搬送

上述の蒸発吸熱方式においては、圧力が低いほど冷媒の蒸発温度(沸点)が低くなり、かつ冷媒蒸気の移動抵抗も小さくなる。したがってこの吸熱及び熱搬送システム全体の内圧を低下させ、系内を真空状態にした中に冷却媒体のみを封入し、蒸発温度(吸熱温度)の低減と、搬送効率の改善を図っている。

これはいわゆる『ヒートパイプ』そのものであり、今回の変圧器は『ヒートパイプシステムで内部の熱を吸収し放熱器に搬送して放熱をする変圧器』と言うことになる。

(4) ヒートパイプとは

図1にヒートパイプの構造図を示す。

脱気した容器内に蒸発冷媒(水やアルコールなど)を封入し、この状態で容器の一部を加熱すると加熱された部分の冷媒が吸熱して蒸発し、蒸発した冷媒蒸気は加熱されていない低温で蒸気圧が低い部分に移動し、この部分で結露して凝縮放熱を行う。このように減圧容器内の一部で冷媒が蒸発吸熱をし、この蒸発した冷媒が低温部分に移動して凝縮放熱をする熱の搬送装置をヒートパイプと呼んでいる。

ヒートパイプは内部を減圧することにより、冷媒の沸点を下げた吸熱効率を高めると共に、冷媒蒸気の移動抵抗を減少させることで、より高い伝熱特性が維持されていることは周知のとおりである。

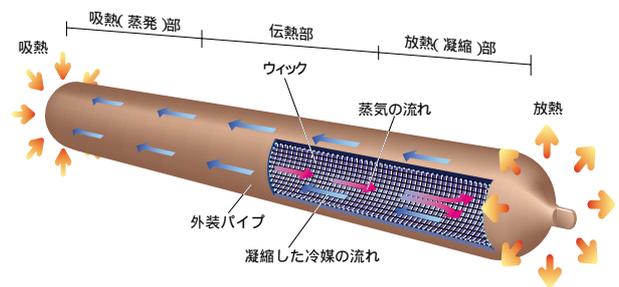


図1 ヒートパイプの構造と動作原理

3. 蒸発冷却形変圧器の構造

図2に、今回開発した変圧器の外形と内部構造の概念図、図3に放熱システムの概念図を示す。

今回の開発は冷却システムの開発で有り、その効果をより明確に把握するために変圧器本体は従来形のコイル及び鉄心をそのまま使用してその効果を確認した。

この蒸発冷却システムでは、変圧器内部で発生した熱は従来どおりまず絶縁媒体に伝えられ、この絶縁媒体が吸収した熱がヒートパイプシステムの吸熱部で冷媒に伝達される。この吸熱部では蒸発潜熱を利用して多量の熱を吸収して冷媒を蒸発させ、絶縁媒体の温度を下げる。蒸発した冷媒は、吸熱部と放熱部の温度差によって生じる圧力差(蒸気圧差)により自動的に放熱部に移動し、ここで放熱凝縮して液体に戻り、再び吸熱部に循環される。

このシステムでは吸熱部と放熱部の温度差が所定の温度差を越え、所定の蒸気圧差が生じると冷媒は沸騰を開始する、沸騰が始まると冷媒の温度を所定の温度(沸点)以上に上昇させることなく多量の蒸発潜熱を吸収することが可能になる。

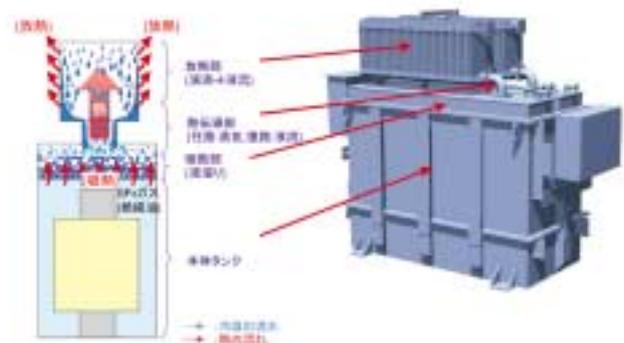


図2 ルボックス(LVACS)の原理



図3 放熱システム概念図

4. 冷却媒体の選択

図4に変圧器用のヒートパイプに使用可能な蒸発冷媒の代表例を示す。

今回はこの中から水を選び、ヒートパイプの蒸発冷媒に純水を使用して開発を進めた。(参考までに水の沸騰温度と圧力の関係を図5に示す。)

	冷媒	沸点	備考
1	水	100.0℃	(不燃)
2	ベンゼン	80.1℃	(可燃)
3	エタノール	78.3℃	(可燃)(有毒)
4	メタノール	64.7℃	(可燃)(有毒)
5	アセトン	56.5℃	(可燃)
6	HCFC-225	54.0℃	(代替フロン)
7	R-113	47.7℃	(現在は使用不可)
8	塩化メチレン	39.8℃	(代替フロン) ジクロロメタン
9	HCFC-141b	32.2℃	(代替フロン)
10	HCFC-123	27.7℃	(代替フロン)

図4 主要冷媒の沸点比較

気圧			沸点(℃)	備考
(Torr)	(MPa)	(気圧)		
760.0	0.1013	1.000	100	地球上の平地
525.9	0.0701	0.692	90	
500.0	0.0667	0.658	87	富士山頂
355.2	0.0474	0.467	80	
149.4	0.0199	0.197	60	
92.5	0.0123	0.122	50	
76.0	0.0101	0.100	46	
55.3	0.0074	0.073	40	
17.5	0.0023	0.023	20	
9.2	0.0012	0.012	10	
4.6	0.0006	0.006	0	
0.8	0.0001	0.001	-20	凍結真空乾燥

図5 水の沸点と圧力の関係

(1) 蒸発冷媒に純水を使用する場合の利点

- ・0.1気圧以下になると沸点が50以下になるので変圧器の使用温度に適している。
- ・100以下では蒸気圧が大気圧を越えないので放熱器に大きな圧力負担がかからない。
- ・冷却性能 吸熱性能が高い(潜熱,比熱が大きい)。
- ・人や環境にやさしい(安全,無毒,不燃)。
- ・取扱が容易(安価で入手が容易)。

(2) 問題点と対応策

- ・金属腐食の問題 = 真空中で使用されるので酸素がなく、水が有っても金属は腐食されない。
- ・金属の水酸化反応 = 抑制剤で容易に防止できる。

5. 蒸発冷却システムの特長

(1) 大量の熱を迅速に吸収する事ができる

- ・蒸発潜熱を利用しているため、単位冷媒当たりの吸収熱量が桁違いに大きくなり、大量の熱を迅速に吸収することができる。
- ・沸騰温度では多量の冷媒が蒸発して蒸発エネルギーを吸収するので、冷媒の温度を沸点以上に上昇させることなく一定の温度で多量の熱エネルギーの吸収が可能になる。

(2) 熱の搬送速度が速くなる

- ・絶縁媒体の温度差に起因する自然対流効果だけでは、対流速度(加熱絶縁媒体の流動速度)にも限界があり、大量の熱を迅速に搬送する手段としては充分ではなかった。
- ・蒸発吸熱システムによれば、吸熱蒸発した冷媒は吸熱部と放熱部の温度差に起因する蒸気圧差によって駆動されるので、温度差によって生ずる自然対流による移動に比べると、はるかに迅速に移動するので熱の搬送速度が速くなる。

(3) 放熱器の放熱面を無駄なく有効に活用できる

- ・図6に稼働中の変圧器のサーモグラフを示す。

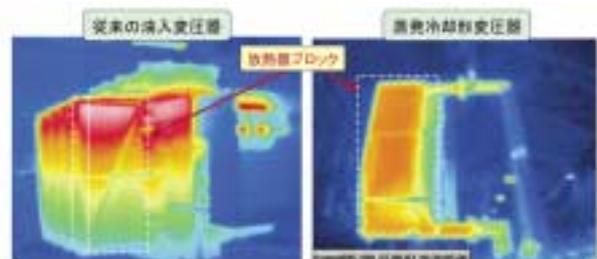


図6 放熱器の温度分布比較

- ・従来の放熱器は『放熱器を通して絶縁媒体を冷却して本体に返還する』と言う責務を負わされているため、媒体が放熱器を通過して出口に到達するまでの間に放熱を完了している必要がある。したがって、結果として大きな放熱効果を発揮できるのは、入口の近傍で常に高温の油で満たされている放熱器上部のみと言う状況にならざるを得ない。
- ・蒸発冷却システムを採用すると放熱器に循環されるのは冷媒蒸気なので、蒸気は蒸気圧が低い低温部分に自動的に廻り込むため、放熱器全体にほぼ均一に熱が伝達される。このため、結果的に放熱器の放熱面全体を有効に活用することができる。
- ・放熱器の放熱面全体を有効に活用することができるので、従来方式と比べて放熱面積を減らしても従来と同等の放熱効果を得ることができ、結果として放熱器ユニットを減少し、変圧器の小形化につなげることが可能になる。

(4) 絶縁媒体の使用量を低減できる

- ・蒸発冷却方式を採用すると従来のように放熱系統に絶縁油やSF₆ガスを使用する必要がなくなるのでこの分だけ絶縁媒体の使用量を低減することができる。

(5) 放熱器の分離設置が可能になる

- ・蒸発冷却方式では吸熱部から放熱器への熱の移動は蒸気による熱の搬送なので、従来のように流体の自然対流の場合と異なり、駆動力が大きくかつ移動抵抗も少ないので、遠方への搬送が容易になる。したがって、変圧器本体は屋内、放熱器は屋上、と言うような分離設置が可能になる。

(6) 分割輸送が容易になる

- ・変圧器は大形になると輸送時の寸法制限などの関係から、変圧器本体と放熱器を分割して輸送しなければならないケースが少なくない。しかし今回の蒸発冷却システムの場合は切り離し部分には絶縁油やSF₆ガスなどの絶縁媒体を使用していないので、分割輸送をしても現地での油やガスの処理を必要とせず、現地での作業が簡略化され、かつ現場や環境を汚染する心配もない。

6. 蒸発冷却形変圧器の特長

- ・放熱器が小型になるのでその分だけ変圧器全体の小型化が可能になり『設置面積を縮小できる』
(従来品に比べ弊社比率で15~40%の縮小が可能)
- ・この放熱システムは『高効率変圧器やアモルファス変圧器への適用も可能である』
- ・放熱器の分離設置が可能になり『狭いスペースへの

変圧器の設置が容易になる』

- ・分割輸送しても現地での油処理などが不要になり『分割輸送が容易になる』
- ・放熱器の内部は冷媒(水)の蒸気が入るだけなので、従来型に比べて絶縁材料が節約でき、その分だけ『環境負荷が軽減される』

7. 信頼性の確保

- ・この蒸発冷却システムは冷却媒体の沸騰温度を下げてより吸熱効率を高くするため、冷却システム系統の内部が負圧になるよう管理している。したがって、万一この冷却システム系統の気密度が低下すると、冷媒の沸騰温度が上昇し、かつ冷媒蒸気の移動速度にも影響を与え、吸熱及び伝熱特性が著しく低下する。このため、今回はこの蒸発吸熱形放熱システムを複数化し、各システムの内部圧力をその差圧により相互に監視し、システムの異常が容易に感知できるようにした。
- ・また、放熱システムのうちどれかが故障しても残りのシステムで70%程度の負荷に対応できるよう配慮した。

8. 製品の概要

図7に新しい放熱システムを採用した製品の1例を紹介する。



図7 22kV SF₆ガス絶縁変圧器
蒸発冷却形変圧器 (LVACS) Liquid Vaporization Advanced Cooling System

9. あとがき

今回開発した変圧器は、冷却媒体の蒸発吸熱作用を利用して機器内部の熱を吸収し、蒸発した冷媒蒸気が放熱器に移動し、ここで凝縮することにより放熱をする、いわゆる『ヒートパイプの原理』を利用したもので、『吸熱効率』と『搬送速度』を高めることで放熱器の小形化に成功した。

執筆者紹介



下山勝利 Katsutoshi Shimoyama
技師長



梶村和成 Kazunari Kajimura
グローバル事業本部
静止機器事業部
開発グループ グループ長



後藤寿之 Hisayuki Goto
グローバル事業本部
静止機器事業部
開発グループ



三島修一 Shuichi Mishima
グローバル事業本部
静止機器事業部
技術部 設計グループ



小林卓士 Takushi Kobayashi
産業・電力システム事業本部
産業システム事業部
システム技術部 グループ長



清滝和雄 Kazuo Kiyotaki
技術開発研究所
解析技術センター
CAEグループ