

電力用変圧器の $\tan \delta$ について

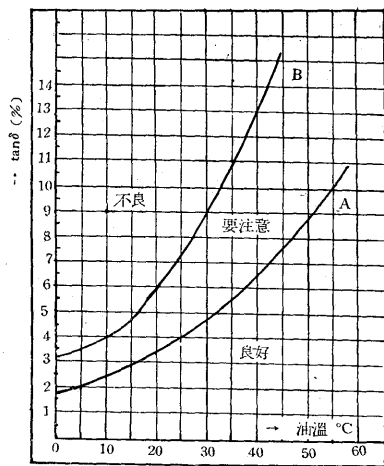
On the Loss-Angle ($\tan \delta$) of Power Transformers

技術部変圧器課 穴原良司

I. ま え が き

運轉中の電力用変圧器の絶縁劣化度を判定し、其の保守状態を良好ならしめるために、最近 $\tan \delta$ の実測による絶縁劣化早期検出の方法が提案され、既に若干のデータも発表されている⁽¹⁾。これはアメリカにおける同種の試みに刺戟された事と⁽²⁾、我が国において最近現場試験に適するような、簡単な損失角計 ($\tan \delta$ メーター) が考案された事⁽³⁾によるもので、最近とみに普及化の傾向を示して來た。

アメリカにおいては、既に 10 年前に、それまで 10 年間にわたつて、夥しい数にわたる電力用変圧器、P.T. C.T. プッシング等の $\tan \delta$ 測定を行い、この測定法による機器の早期劣化判定が最も優れたものである事を指



第 1 図—電力用変圧器温度—損失角特性
A: 良好範囲の制限 B: 要注意範囲の限界

Fig. 1—Power-factor versus temperature correction curve for transformer winding (from field test).

A: Limit of good insulation.

B: Limit of deteriorated insulation.

摘すると共に、電力用変圧器に対しては、第 1 図のような温度特性曲線を与え、良好、要注意、不良の 3 段階を区別している。そして半年に 1 度位の定期的測定を行い、この基準によつて変圧器の乾燥、巻替等の修理を行

つた結果、事故数を相当程度低下せしめる事が出来たと報告している。(第 1 図の特性曲線は American Gas & Electric Co. という電力会社の与えている曲線であり、需要者側の標準値である事に注意を要する。)

これに対して、我が国の実測例は極めて少く、殊に経年データが皆無であつて、確然たる結論は得られていないが、電気学会雑誌の昭和 25 年 6 月号「電力用変圧器絶縁の損失角試験」と題する報告においても、其の結論の中に、

1) $\tan \delta$ の標準値は未だ定まらないが、一應米国の例を参考とする事が出来る。

2) $\tan \delta$ 測定法は完全ではないが、最良の変圧器絶縁診断法である。

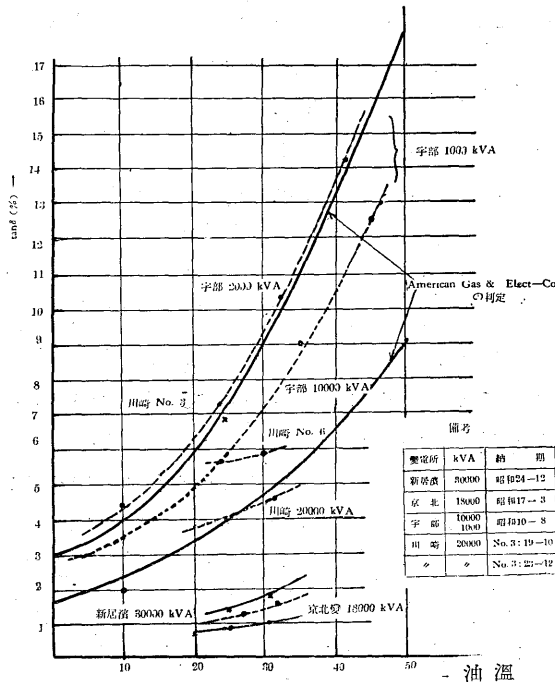
と述べて、本測定法を推奨している。

これらの動きに対して、我々も当社製新旧変圧器の $\tan \delta$ 現場測定を行い、現在も新製のあらゆる変圧器に対してデータ集積につとめているが、其の値は極めて不同で、甚だしい場合には、新製品について既に不良段階に入るものもある反面、相当運轉後のものが尙極めて良好範囲に入つていたというものもあり、 $\tan \delta$ 判定法が果して適確なものであるか否かという事がかなり疑問視されるに至つた。そこでこれらの問題を組織的に究明するため、材料研究所、川崎工場の協力を得て、過去半年間にわたつて努力した結果、上記の疑問を略明かになし得るに至つた⁽⁴⁾。以下は其の報告の概要である。

II. 富士変圧器の $\tan \delta$ 値

第 2 図に現在迄実測せる電力用変圧器の値の一部を示す。之より分る如く、其の値は同時納入の変圧器間にも大きな差違があり、又新旧製品の $\tan \delta$ 値間にも予期せられる傾向が見出し得ない。もしアメリカの例を其のまま絶縁劣化度の判定基準にとると、当社製変圧器は其の殆ど全部が要修理品となつてしまうおそれがある。

以下の報告は、このアメリカの判定基準が必ずしもあらゆる変圧器に対して適用し得るものでない事、及び



第2図 電力用変圧器の $\tan \delta$
Fig. 2—Power-factor characteristics of Fuji power transformer.

$\tan \delta$ 診断法の効果は万能なものではなく、その適用に限りが存在するものである事を、実験的解析により明らかにしたものである。

III. 変圧器と変圧器絶縁油の $\tan \delta$ との関係

供試変圧器			変圧器絶縁油		
納期	kVA	$\tan \delta$	$\tan \delta$	酸價	破壊電圧
昭 17-3	18000	1.2%	0.85%	0.053mg	£8.3kV
10-8	20000	9.2	1.40	0.121	38.8
18-10	20000	4.3	0.85	0.151	37.2
23-12	20000	5.3	2.5	0.125	36.5
23-12	20000	6.4	3.5	0.126	40.1
25-3	10000	7.3	1.2		
24-7	6700	2.4	0.46		
25-4	10000	1.27	0.41	0.085	32.2
25-5	12000	0.53	0.11	0.087	35.5
10-8	10000	6.3	1.93	0.183	22.7

[備考] 1. $\tan \delta$ 値は 20°C に於ける値を示す。
2. 変圧器の $\tan \delta$ は $\tan \delta$ メーター、油の $\tan \delta$ は Schering Bridge による。

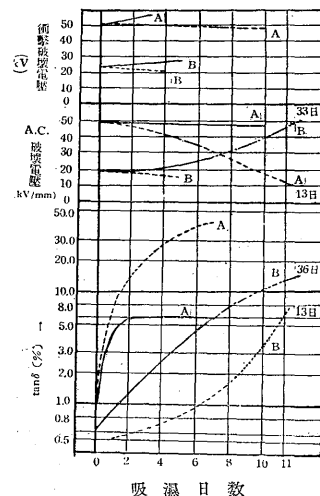
第1表—変圧器及変圧器油損失角
Table 1.—Power-factor of power transformer and its oil.

一概に変圧器といつても、その絶縁物が油、クラフト紙、プレスボード等の複合誘電体からなるとみなされるものである以上、其の相互間の関係を明かにする必要がある。そして変圧器の $\tan \delta$ に支配的な影響を与える原因を求める事は重要な課題であらうと思われる。そこで先ず我々は油に着目し、 $\tan \delta$ を測定した変圧器より油をぬきとり、其の特性を調べてみた。第1表に之を示す。

これによつてみると、変圧器と其の絶縁油の $\tan \delta$ との間には一致した傾向が見出されず、更に又油の $\tan \delta$ と其の耐圧、酸價（単位 mg, 油 1 gr. 中に含まれる全酸を中和するに要する KOH の量をもつてあらわす）との関係も見出せない。したがつて変圧器全体の $\tan \delta$ 測定のみによつて、油の劣化度を判定する事は困難であるといわなければならない。これは油の $\tan \delta$ の、変圧器のそれへの影響の程度が他の誘電体（クラフト紙、プレスボード等）に比して軽い場合がある事を示すものである。量的に最も重要な絶縁材料である油が、変圧器の $\tan \delta$ に殆ど影響をもたないという事は、注目されてよい事と思われる。他社製品の例であるが、油の酸價が 0.5 という極端な悪値を有しているのに、変圧器の $\tan \delta$ が良好範囲に属していたという場合すらあつたのである。——因みに日本発送電の油劣化の限度は酸價 0.2 という事になつている。

IV. クラフト紙及プレスボードの特性

変圧器を一種の複合誘電体とみなす時、油以外の重要な絶縁材料としてクラフト紙及プレスボードがある。これらはそれ自身のもつ $\tan \delta$ が相当大きい上に、吸湿等の現象が加わつて、変圧器の $\tan \delta$ に与える影響はかな



第3図—プレスボードの吸湿性
—80% 恒湿槽内油中
...80% 恒湿槽内気中
A: 油浸プレスボード
B: ワニス含浸プレスボード
Fig. 3.—The influence of absorption of moisture to break down voltage (A. C. and Impulse) and $\tan \delta$ of pressboard.

り支配的である。これらの諸特性に関する材料的考察は、本号所載の井関昇氏の報告にゆずるが、簡単にいつて次の如き興味ある事実が明かにされている。

種別	厚さ(m)	処理条件	破壊電圧(kV/mm)	tan δ (%)	誘電率	
クラフト	K	0.29	90°C 氣中乾燥	7.24	0.29	2.34
	ク	ク	90°C 油中乾燥	48.90	0.52	3.90
プレス	A	0.50	90°C 氣中乾燥	13.9	0.40	—
	ク	ク	高真空ワニス含浸	18.9	0.48	2.6
	ク	ク	90°C 油中乾燥	50.6	1.12	4.0
	B	0.72	90°C 氣中乾燥	12.97	0.44	3.6
ボード	ク	ク	90°C 油中乾燥	48.12	8.8	3.7
	C	0.80	90°C 氣中乾燥	13.86	0.4	3.3
	ク	ク	90°C 油中乾燥	49.32	1.6	4.7
	D	1.59	90°C 氣中乾燥	11.88	0.46	3.2
ド	ク	ク	90°C 油中乾燥	37.77	13.2	5.0
	E	2.4	90°C 氣中乾燥	13.6	0.43	3.5
	ク	ク	高真空ワニス含浸	16.5	0.48	3.3
	ク	ク	90°C 油中乾燥	30.4	4.56	5.6

第2表—クラフト紙、プレスボードの tan δ 特性
Table 2—tan δ characteristics of Kraft-paper and pressboard.

1) プレスボードは熱風乾燥及ワニス含浸処理によつては、其の tan δ が何れも 1% 以下の極めて低い値を示すに対して、油浸処理を施すと、メーカー別及び種類別に極めて大きいひらきがみられる場合がある。

2) tan δ のはるかに大きい油浸プレスボードの交流耐圧は、tan δ の小さいワニス含浸プレスボードのそれに比して 3 倍乃至 4 倍程度高い。

3) 油浸処理後のプレスボードの交流破壊電圧は、長時間を問わず tan δ の大小には余り関係しない。即ち tan δ と交流破壊電圧との間には判然とした関係が見出せない。

4) クラフト紙及びプレスボードは吸湿によつて、tan δ が上昇し、且つ交流破壊電圧も低下するが、インパルス耐圧は吸湿及び tan δ の値と無関係に少しも低下しない。

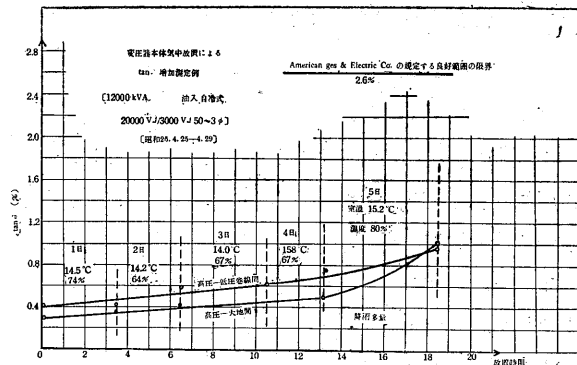
これらの結果は、何れも一致して、絶縁物の劣化判定に tan δ を用いようとするゆき方に、はげしく抵抗している。即ち変圧器の tan δ がかかる材料の選択如何によ

り、破壊電圧等の電気的特性を変えないで、任意に変更し得るという事実は、第1図の如き1本の曲線によつて、処理の異なる多くの変圧器の良否を弁別し得ぬ事をつよく主張しているようである。

ただ次の事実は、この実験によつても明かに示されており、tan δ 診断法の特長と考えるべきであろう。即ち或特定の絶縁物が吸湿すれば、それによつて tan δ は上昇するという事である。故に或特定の變圧器につき経年的に tan δ 実測を行い、其の tan δ の上昇をみれば、其の變圧器の吸湿其の他の絶縁物劣化状態判定が可能であろうと思われる。この意味においては、變圧器の絶縁劣化度の判定として tan δ 法が有力なものであるとして推奨し得るであろう。ただアメリカの基準の直輸入に我々は反対するのである。

V. 變圧器吸湿による tan δ の上昇

運轉中にある電力用變圧器は、点檢其の他の事情によつて、本体をタンクより吊り上げてこれを氣中にさらす場合がある。其の場合富士變圧器は絶縁物にワニス処理を施していないため、吸湿速度が早く tan δ の上昇も亦はげしいであろうという懸念がある。前節のプレスボード吸湿による tan δ 増大の傾向もこのような疑をおこさせる。第4図に 12,000 kVA の電力用變圧器を延 18 時

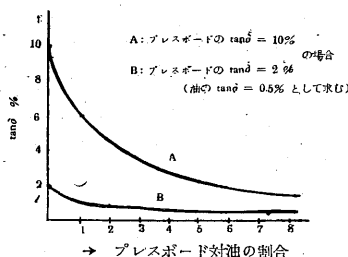


第4図—電力用變圧器の吸湿による tan δ 増加例
Fig. 4—The tan δ characteristic of power transformer by absorption for the moisture

間にわたつて氣中放置吸湿せしめた場合の tan δ 増加例を示す。(これは晝間、變圧器本体をタンクより吊り上げ空氣中に放置して、tan δ 変化を毎日実測したものである。)これより見られる如く、變圧器の tan δ は吸湿により上昇する故、出来るだけ氣中放置を最短時間内におさめる事が望まれるわけである。これより見ても tan δ 法は吸湿判定に重要な意味を有する事が知られるであろう。

VI. 変圧器絶縁設計と $\tan \delta$ との関係

変圧器の $\tan \delta$ は其の材料面のみから変るものではなく、其の設計方式如何によつても相当に変つて来る。変圧器を簡単に油とプレスボードが直列に結ばれている複合誘電体とみて、計算を行つてみると、油とプレスボードの占める割合の相違によつて、全体の $\tan \delta$ は第5図の如くに変化する。A は $\tan \delta$ の大きいプレスボード



第5図—設計による $\tan \delta$ 変化

Fig. 5.—The variation of $\tan \delta$ by the design of transformer.

を用いた場合、B は小さい $\tan \delta$ を用いた場合であるが、何れにおいても、油のダクトが十分とつてある設計においては、しからざる場合よりも $\tan \delta$ の値は小さくなるのである。これよりしても、設計方針の異なる変圧器を律するのに、1本の曲線による事の乱暴さを指摘し得るであろう。

VII. む す び

以上我々は $\tan \delta$ 診断法のもつ意味と效用を明かにし、其の限界を規定するために、過去半年間にわたつて極めて大規模な実験をつづけて来た。これより得られる結論は次の如くである。

(1) 変圧器の $\tan \delta$ 実測によつては絶縁油の劣化度を判定する事は出来ない。

(2) 油浸プレスボードの $\tan \delta$ は、熱風乾燥、ワニス含浸のそれに比べて著しく増大する場合があります、其の値はメーカーにより、又同じメーカーにおいても其の厚さにより極めて不同である。これが同時製作の変圧器についても其の $\tan \delta$ が相違する理由と考えられる。

(3) 油浸紙及油浸プレスボードの $\tan \delta$ は、其の長時間、短時間破壊電圧に殆ど無関係である。即ち $\tan \delta$ の

大小と他の電気的特性とは余り関係がない。これより見ると $\tan \delta$ 値のみによつて絶縁物の劣化度を判定する事は危険であると言ひ得る。

(4) 絶縁物の $\tan \delta$ が小さい事は、材料的に見てたしかに好ましい事には相違ないが、しかしそれが変圧器に用いられた場合、其の運轉動作を左右する幾何の原因になるかが疑われる。

(5) 設計も異り、製作方法、絶縁物処理方法も全く異なる新製品の變圧器を律するのに、ただ1本の判定曲線による事は些か独断的にすぎる。

(6) $\tan \delta$ 診断法が有する特長は、或る特定の變圧器の逐年にわたる $\tan \delta$ 増大の傾向である。これは吸湿と劣化の2原因によるものと思われるので、これに関する限りは、最良の絶縁診断法であろう。しかし其のもつ意味をこれ以上に迄拡大して過大視する事は多大の疑問が存在する。

(7) 以上の理由よりして我々は劣化判定基準の米国家の直輸入に反対するものである。

× × ×

現在日本発送電主催の絶縁劣化早期検出調査委員会は、變圧器の $\tan \delta$ 判定法に関して、最終的な結論を急ぎつつあり、其の中には其の基準として、第1図に示した判定曲線が採用されようとする傾向にある。現在4大メーカーといわれる中であつて、他の3社はみなこの曲線がよい基準である事を実測例より説明しており、ひとり当社製變圧器のみがこれにはづれている。そして現在上記委員会においても、我々は上記の実験データをバックとして、かかる不合理な結論に反対しているものである事を附言する。

尙以上の測定並に実験は、過去半年間にわたつて、技術部、材料研究所、川崎工場の密接な協力のもとに遂行し得たものであり、これに参加せられた人員は極めて多数にのぼる事を特記して、深甚の謝意を表したい。

(25-11-22)

文 献

- (1) 富山, 藤高, 法貴, 木沢: 電学誌, 昭 25-6, p. 210.
- (2) J. W. Gross: E. E. 1938, p. 589.
- (3) 法貴, 木沢: 電学誌, 昭 24-2, p. 59.
- (4) 穴原, 井関: 三学会連合大会予稿, 昭 25-11.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。