

直撃雷電流波形対応の 新しい過電圧保護器の必要性について

Necessity of Lightning Current Arresters Specified for Direct Lightning Protection



竹谷 是幸*

キーワード：直撃雷，雷電流アレスタ，動作協調

1. はじめに

雷保護の手段としては大別して外部雷保護と内部雷保護の二つがある。外部雷保護は受雷部(避雷針)，引き下げ導体，避雷用接地極等からなり直撃雷を受けた場合に建物を破損，火災から保護することを主目的としている。内部雷保護は建物の内部に装備された回路と電気機器を過電圧から保護することを目的とし，従来は誘導雷対策が主体であると考えられてきた。すなわち外部雷保護と内部雷保護は別個のものであって，直接の関係はなく内部雷保護を検討する場合は外部雷保護設備を流れる直撃雷電流による磁界によって建物内部の回路に誘起される誘導電圧に対する対策を検討すれば良いという考え方である。しかしこの考え方は誤っていて，建物内部の回路や電気設備を保護するためには直撃雷電流の分流分を考慮しなければならないこと，及び過電圧保護器は直撃雷電流の分流分を流し得る能力がなければならないことを解説するのが本稿の目的の一つである。またこのような能力を持つ過電圧保護器は一般に用いられているバリスタ(酸化亜鉛)ベースのものではなくて放電ギャップ方式のものであるが，従来この動作原理によるものには統流があり，とかく上位の過電流保護器との動作協調が困難となりがちであった。本稿ではその最新の技術解決方法についても触れることとし，直撃雷電流波形対応の過電圧保護器の最新の技術動向についても述べることにする。

2. 直撃雷保護と誘導雷保護

まず過渡過電圧保護の対象としては次の3種類がある。

①開閉現象による過電圧

遮断性能の良い開閉器による誘導回路の開閉により発生。

②誘導雷による過電圧

雷電流による磁束と電気回路が鎖交し，その磁束の変化により発生する誘導電圧。

③直撃雷による過電圧

直撃雷の分流分が電気回路に侵入することによる過電圧。

上記のうち開閉現象による過電圧は比較的にエネルギーが小さいために，その対策は誘導雷による過電圧保護対策が講じられていれば，これによって通常はカバーできる。しかし直撃雷による過電圧は誘導雷による過電圧に比較してエネルギーが大きく，はるかに過酷であり，誘導雷対策によって直撃雷対策を代替することはできない。

直撃雷に対する保護は，避雷針を建て，避雷針が受けた直撃雷電流を引き下げ導体により接地極へと導き，接地極から大地へと放流してやれば，それで事足りると考えられている場合が多い。これがいわゆる外部雷保護であって，内部雷保護は外部雷保護とは無関係であるという誤った考え方がある。そうなる直撃等に対する保護は外部雷保護(避雷針-引き下げ導体-避雷針用接地極)によってのみ対処し，誘導雷保護は内部雷保護(誘導雷保護用過電圧保護器)によって対処すればよいという単純な分業論で対処されるようになってしまいがちだが，これが完全に間違っている。外部雷保護と内部雷保護とは切っても切れない関係にあり，外部雷保護設備を施設することによって必然的に直撃雷電流の分流分を放電できる過電圧保護器が必要となってくる。

*エース国際技術コンサルティング代表

昭和7年2月5日東京都生まれ。29年横浜国立大学工学部卒業。同年富士電機㈱入社。53年汎電事業部技術部長，56年光発電部長，59年京セラ㈱ソーラーエネルギーシステム事業部長，平成2年中立電機㈱常務取締役，6年専務取締役，8年専務理事。13年より現職。

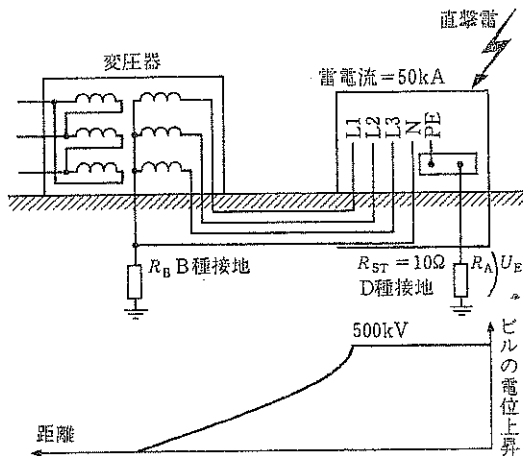


図-1 直撃雷を受けた場合の建物の電位上昇

それはどのような理由からであろうか。まず 図-1 を参照していただきたい。

今、接地抵抗 R_A が $10\ \Omega$ の建物が $50\ \text{kA}$ の直撃雷を受けたとすると、この建物は図示のごとく $500\ \text{kV}$ に電位上昇する。この電位は建物から離れるにつれて低減し、やがては零電位に収れんする。この建物に低圧配電線が引き込まれているとすると、その電源変圧器の中性点は B 種接地と接続されているので通常は零電位とみなされる。建物の中に引き込まれている配電線は、この B 種接地に接続されている以上、零電位である。他方、この配電線により給電される電気機器の露出導電性部分(ケース・カバー)には D 種接地がとられており、ということはこれら機器のケース・カバーは建物の鉄筋・鉄骨に接続されていることにほかならない。つまりは上記の雷電流がピークとなる瞬間には露出導電性部分が $500\ \text{kV}$ の電位を持っているということである。すなわちこの瞬間には電気機器の低圧絶縁には $500\ \text{kV}$ の電圧がかかるということであり、このような電圧に耐え得る低圧の絶縁は存在しない。そこでこのような状態においては機器絶縁を保護するために過電圧保護器によって機器の露出導電性部分と機器内に引き込まれている充電線を雷現象の瞬間だけ短絡することが行われる。すなわちこのような状態においては過電圧保護器は直撃雷電流の分流分を通過しなければならない。この直撃雷電流の分流分は過電圧保護器を経由して充電線に流入し電源の接地点へ向かって流れていく。図-2 は避雷針が直撃雷を受けた場合に雷電流がどのように分流されるかを示している。上記の理由で外部雷保護と内部雷保護は密接な関係があり、外部雷保護設備が直撃雷を受けた場合は内部雷保護設備が施工されていれば必ず直撃雷電流の分流分が各電気回路に流入することになる。

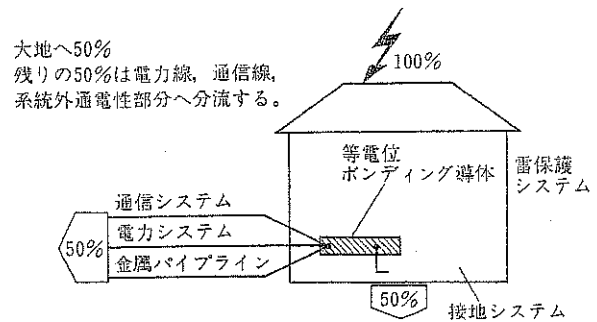


図-2 雷電流の分流状況を示す図

3. 直撃雷と誘導雷の通過電荷量の比較

さてこの直撃雷電流の分流分の波形はどうかというと、波頭が $10\ \mu\text{s}$ で波尾が $350\ \mu\text{s}$ の波形 ($10/350\ \mu\text{s}$) であり、これを誘導雷の電流波形 ($8/20\ \mu\text{s}$) と比較したものが図-3 に示されている。図では誘導雷電流の波高値を直撃雷電流の波高値の $1/5$ と仮定している。図-3 の横軸は時間で縦軸は電流を示しているので、この曲線で囲まれる面積は通過電荷量 Q を示している。面積比すなわち通過電荷量 Q で比較すれば、直撃雷に対応する過電圧保護器を 40 とすれば誘導雷に対応する過電圧保護器はわずか 0.4 である。もし雷電流の波高値と誘導雷電流の波高値を同一とするならば、両者の通過電荷量の間には 20 倍の開きがある。すなわち以下の数式によって表される。

$$Q(10/350\ \mu\text{s}) = 20 Q(8/20\ \mu\text{s})$$

以下、 $10/350\ \mu\text{s}$ 波形対応の過電圧保護器を雷電流アレスタと、また $8/20\ \mu\text{s}$ 波形対応の過電圧保護器をサージアレスタと呼称することにする。したがって建物が直撃雷を受ける場合、いい換えれば避雷針が設置されている場合は、サージアレスタのみで対応すれば、これはおそらく 1 回の雷撃で破壊され短絡状態となってしまふ。このような状態は充電線と接地設備が短絡された状態となり、感電災害を誘発する可能性があるので絶対に避けなければならない。

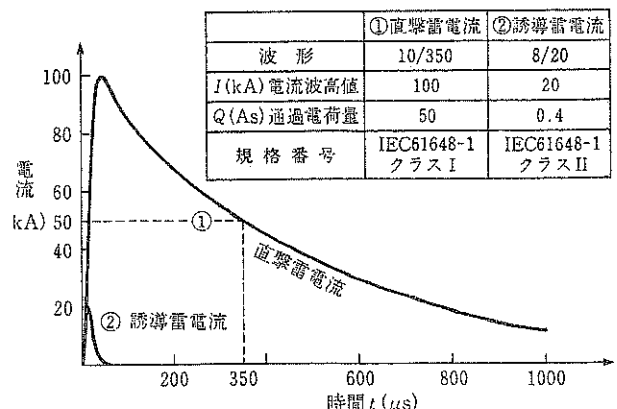


図-3 直撃雷電流と誘導雷電流の波形比較

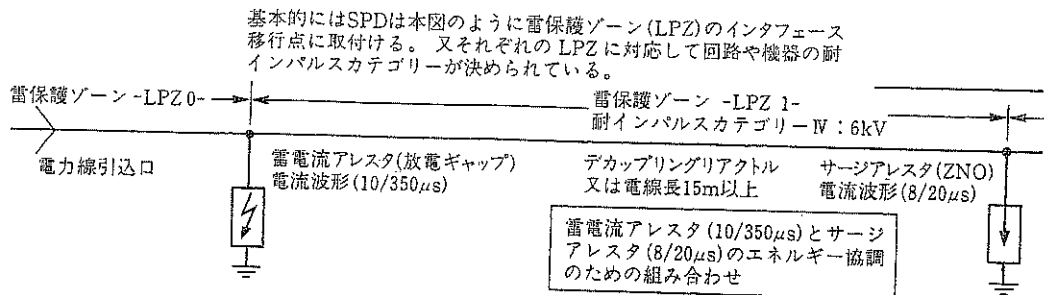


図-4 雷電流アレスタ(10/350 μ s)とサージアレスタ(8/20 μ s)のエネルギー協調

4. 複合形過電圧保護装置

直撃雷の分流分に対する保護を確実にするためには、雷電流アレスタ(波形 10/350 μ s, 制限電圧 4 kV 以下)とサージアレスタ(波形 8/20 μ s, 制限電圧 1 kV 以下)を組み合わせたうえで両者間のエネルギー協調をとらなければならない。このエネルギー協調をとるためには図-4に示すように両者間にデカップリング・リアクトルを挿入接続しなければならない。

5. 雷電流アレスタとサージアレスタの比較

過電圧保護器には原理的にバリスタ、火花ギャップ及びダイオード等が電圧制限要素として使用される。インパルス電流通電性能に関する高度な要求に適合するためには雷電流アレスタには、火花ギャップが用いられ、又過電圧の低減を主目的とするサージアレスタにはバリスタが用いられる。表-1はこれらのエレメントの長所・短所の比較を示している。前項で述べたごとく、火花ギャップ及びバリスタがデカップリング・エレメントを経由して相互に組み合わせられるならば、個別の保護器の短所の一部はカバーする

表-1 過電圧保護エレメントの比較

	バリスタベースのSPD	火花ギャップベースのSPD	モニタ付新複合形SPD
長所	低い電圧保護レベル		低い電圧保護レベル
		高い雷電流放電性能	高い雷電流放電性能
	続流は流れない。		続流はほとんど流れない
		高い TOV 耐量	高い TOV 耐量
短所	雷電流放電性能は極めて制限される。		×
		比較的高い電圧保護レベル	×
	低い TOV 耐量 U_{Tr}		×
		続流が流れる。	×

注：SPD は Surge Protective Device の略で過電圧保護器のこと。

ことができる。このような複合過電圧保護器の特性を更に改善するには、次項で述べるように主火花ギャップに追加して組み込まれた補助火花ギャップに能動的にトリガをかけることによって達成される。

表-1に示すように直撃雷の分流に対処するためには火花ギャップを必要とした。しかし火花ギャップの弱点は続流が流れ、この続流のために上位の過電流保護器との動作協調が困難となることである。この問題は火花ギャップに高度な限流性能を持たせることにより解決される。第7項参照のこと。

6. 雷電流アレスタとしての火花ギャップの改善

これまで述べてきたように、雷電流アレスタはすべての発生予想される雷電流分流分を、確実にまた安全に流せなければならない。また信頼性の高い、また中断しない電力供給の要求から、更に重要な要求が雷電流アレスタに課せられる。すなわち雷電流アレスタが過電圧により動作すると、その動作中及び動作後に電力供給回路に影響を及ぼしてはならないということである。つまり電力供給の中断や、電磁妨害を起こしてはならないし、上位の過電流保護器との動作協調をとるために雷電流アレスタを通過する続流は無視できる程度に小さいものであることが理想である。

さらに雷電流アレスタに対するもう一つの重要な要求事項は商用周波数の一時的過電圧(TOV: Temporary Overvoltage)に対する耐力である。この商用周波過電圧は高圧回路又は低圧回路自身の故障により発生する。雷電流アレスタはこの商用周波数の比較的長い時間継続する過電圧を制限することはできないので、それはこの TOV に対し十分な耐力を持たなければならない。この要求は一般に低い電圧保護レベルの要求とは矛盾する。

そこでもし次の要求事項が一つの雷電流アレスタで実現されるならば理想的なものとなる。

- ①大きなインパルス電流通電能力 I_{Imp}
- ②低い保護レベル U_p
- ③続流電流 I_F が流れないか、また流れたとしても無視

できるだけ小さい。

④ TOV に対する十分な耐力

以上を実現するには、バリスタの長所と、主火花ギャップに対して、モニタユニットによって能動的にトリガされる補助火花ギャップが組み合わされなければならない。この補助火花ギャップに点弧したアークは主火花ギャップの空間をイオン化して低い過電圧によって主火花ギャップを点弧することができ制限電圧を低く抑えることが可能となる。図-5を参照のこと。

このような雷電流アレスタは火花ギャップ-バリスタ(略称 FSV)と呼ばれ、比較的エネルギーは小さいが、しかし頻繁に発生する過電圧(例えば誘導負荷の遮断時に発生する。)に対してはバリスタのように挙動し、にもかかわらず火花ギャップの大きなインパルス電流通電性能を持っている。この種の FSV の動作原理は、インパルス電流の通電性能をもっている火花ギャップの点弧のために、そこを流れ込む分流雷電流のエネルギーに依存してトリガインパルスが発生する方式である。トリガ回路の構成部品としての一つのバリスタと組み合わせることによってバリスタと火花ギャップの長所を最適に活用している。図-6は流れ込む分流雷電流のもつエネルギーに依存して発生するトリガエネルギーを示している。FSV の動作方式は次の三つの状態によって特徴付けられる。

① $U < U_p$ 保護エレメントは動作しない。

U_p : 保護レベル

② $U \geq U_p$ しかし $W_{trigger} < W_{active}$

過電圧の低減(制限)はバリスタにより行われる。火花ギャップは動作しない。

③ $U \geq U_p$ かつ $W_{trigger} \geq W_{active}$

火花ギャップが点弧される。それによってバリスタのエネルギー負担が緩和される。

トリガインパルスがインパルス電流のエネルギーに依存して発生するという動作原理によって、本器に装備されているバリスタは、エネルギーの大きな分流雷電流の場合に

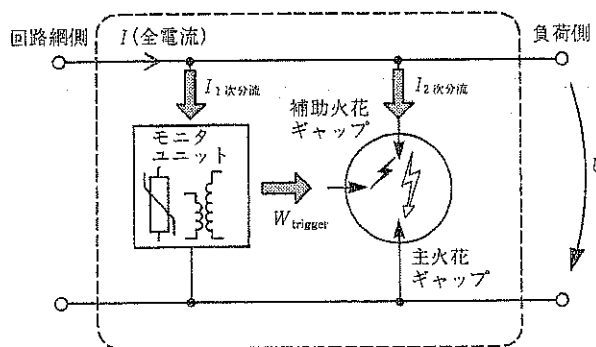


図-5 モニタ・ユニットを持つバリスタ-火花ギャップ方式複合形過電圧保護器の原理図

も過負荷となることはない。このような火花ギャップは $10/350 \mu s$ の波形のインパルス電流の場合は数 100 A の振幅で動作するが、他方、例えば $8/20 \mu s$ の波形の場合は、数 kA の波高値までのインパルス電流を FSV のバリスタの経路を通じて放流する。

7. 火花ギャップ-バリスタの複合型過電圧保護器の続流遮断について

過電圧を制限する際、及びそれに続行する FSV の続流の挙動は、装備されている火花ギャップによって定まる。多頻度で発生するエネルギーの小さな過電圧の制限は続流のないバリスタによって行われ、エネルギーの大きな過電圧の場合には火花ギャップが動作する。FSV のために装備されている火花ギャップは発生する回路の続流を急速に、かつ確実に遮断するか、又は無視できる値に抑制する能力を備えていなければならない。例えば火花ギャップ-バリスタでは配電回路の推定短絡電流 $I_{ps} = 3 \text{ kA}$ の場合の続流 I_F の波高値は 200 A より小さく、また $I_{ps} = 25 \text{ kA}$ の場合に $I_F < 500 \text{ A}$ となる。図-7 参照。

この顕著な限流効果は適切な自力吹消ギャップを用いることによって可能となる。その一例として DEHN+SÖHNE 社の Radaxflow 火花ギャップの原理図を図-8 に示す。アークの周辺の特種合成樹脂からアーク熱によって消弧ガスが発生し、これがアークに対して半径方向に周囲からアークに吹き付けられ、アークを中心軸へと周囲から圧縮する。アーク柱断面の縮小によってアーク抵抗が増大し、その結果、アーク電圧が急激に上昇し、続流を極めて効果的に限流することができる。アーク熱によって発生した消弧ガスは次にアーク軸方向のガス流となり、噴出ノズルから外部へと導かれる。

このような過電圧保護器の場合には、それよりも電源側に設置された過電流保護器との動作協調が問題なくとれるようになる。急速な信頼性の高い限流効果によって、給電継続性を維持し、また雷電流アレスタに対するエネルギー負担を軽減して、副作用のない過電圧保護を実現すること

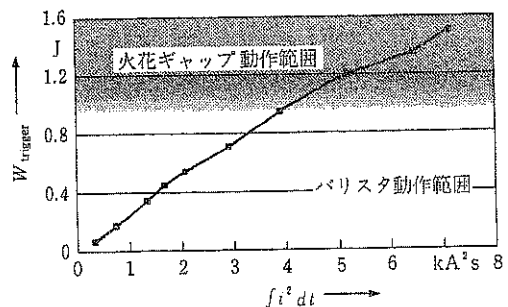


図-6 流入する直撃雷電流の分流分が保有するエネルギーに依存して発生するトリガエネルギー

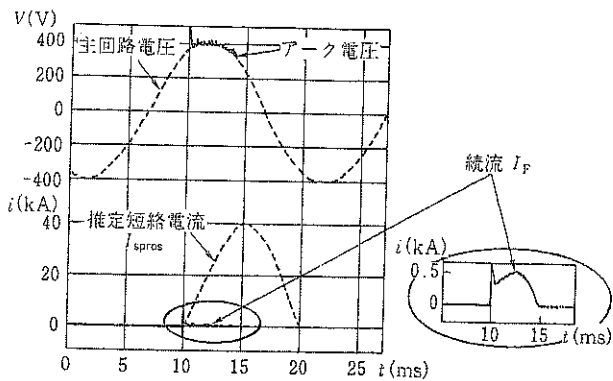


図-7 モニタ付バリスタ～火花ギャップ方式過電圧保護器による続流の超限流と続流の遮断

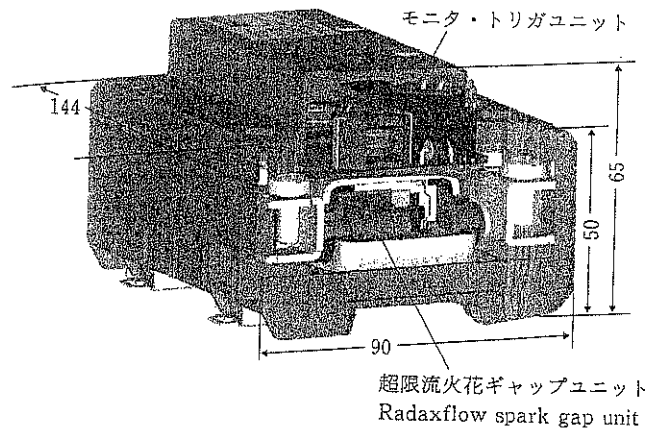


図-10 新しい複合形過電圧保護器 (DEHNventil DEHN+SÖHNE 社)

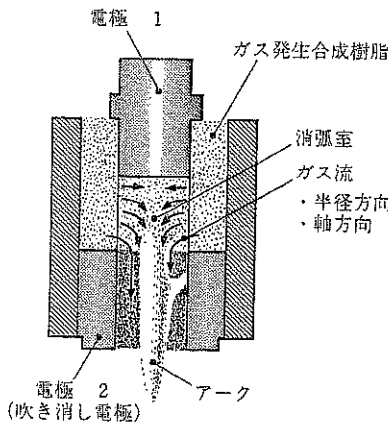


図-8 超限流(Radaxflow)火花ギャップの消弧原理

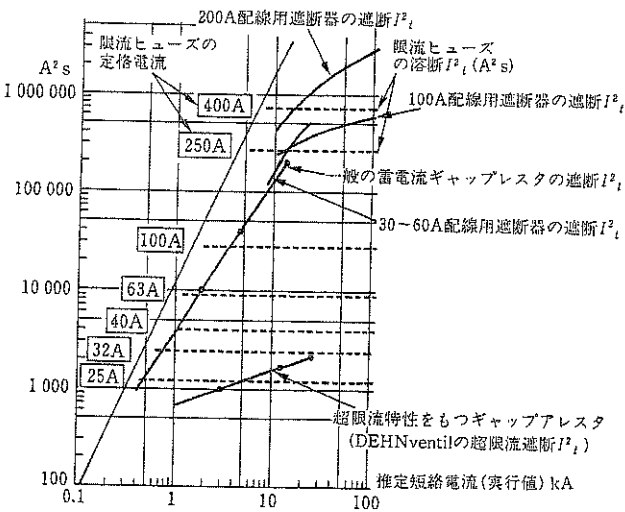


図-9 選択遮断動作協調 (過電流遮断器と超限流特性を持つギャップアレスタ)

ができる。

図-9 は本器が続流遮断する場合の推定短絡電流と I^2t の関係を示しており、このような超限流性能をもっているため、本器と上位遮断器との動作協調が容易なことは明らかである。

8. むすび

雷電流アレスタとトリガ機能をもつサージアレスタを巧

表-2 モニタ付新複合形 SPD DEHNventil TT の技術仕様

最高許容運転電圧 U_c	255 V 50/60 Hz
U_c における続流遮断性能	推定短絡電流 25 kA (実効値) ただし高度な限流性能のためほとんど流れない。
直撃雷電流放電能力 I_{imp}	1極 25 kA / 4極 100 kA (10/350 s)
保護レベル U_p	1.5 kV (L-N/N-PE) 以下
応答時間	100 ns
取り付け	DIN レール

みに組み合わせ1台のアレスタとすることによって多くの特長を持たせることができる。

- ①大きな雷電流放電容量を持ち、かつ低い制限電圧を実現できる。
- ②放電ギャップが強力な限流効果を持っているため続流は無視できる程度に小さい。
- ③そのため上位の過電流保護器との協調が容易である。
- ④高い給電継続性を確保できる。
- ⑤デカップリング・リアクトル等の電気回路への直列要素を持っていないので、回路の定格電流には無関係に適用できる。
- ⑥コンパクトな形状で収納スペースが節約できる。

図-10 は上記の特長を全て備えた複合形過電圧保護器の外観及び構造断面と概略外形寸法を示している。表-2 は本器の技術仕様である。(受付 平成 14 年 2 月 12 日)

参考文献

- 1) Hasse, Peter ほか: Eine neue Generation von folgestromlosen Blitzstromableitern ETZ H1-2 2001.
- 2) Raab, V ほか: Kombi-Ableiter fuer den Blitz-und Ueberspannungsschutz, Elektropraktiker Berlin 55 (2001) 8
- 3) Hasse, P ほか: Erfolgreiche Kooperation zwischen Universitaet und Industrie, ETZ H21/2001
- 4) 竹谷: 事務所における耐雷対策, 電気工事の友 平成 14 年 2 月